

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR  
STACEY BIRON

COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES DE LA SÉCHERESSE  
HYDROLOGIQUE DES NIVEAUX D'EAU MOYENS ANNUELS  
DU FLEUVE SAINT-LAURENT ET DU LAC ONTARIO  
EN RELATION AVEC LES INDICES CLIMATIQUES

AVRIL 2016

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes ont contribué, de près ou de loin, à mon cheminement et à la réalisation de ce mémoire. D'abord et avant tout, je dois exprimer ma gratitude la plus sincère envers mon directeur de recherche, Dr Ali A. Assani. Ces judicieux conseils et son savoir-faire ont guidé ma réflexion tout au long de mon parcours. Je suis reconnaissante de sa disponibilité, de son dévouement et de ses commentaires toujours constructifs.

Au cours des dernières années, j'ai eu l'opportunité de côtoyer des professeurs et étudiants inspirants qui ont gracieusement accepté de m'aider en me donnant des conseils et opinions. Je tiens à leur adresser des remerciements pour les échanges fréquents qui m'ont poussée à m'améliorer. En particulier mes camarades, Yanick Boucher, Francis Clément, Francis Delisle, Raphaëlle Landry et Roxane Paradis qui ont toujours été présents pour moi.

Un merci tout particulier à la Direction des organisations internationales du Ministère des Relations internationales et de la Francophonie du Québec qui administre le Programme de stages au sein d'organisations internationales gouvernementales auquel j'ai eu le privilège de participer. Grâce aux connaissances acquises durant mon stage à l'Alliance des villes des Grands Lacs et du Saint-Laurent, j'ai une meilleure compréhension de la gestion internationale des eaux du bassin versant des Grands Lacs et du Saint-Laurent.

Enfin, je ne peux oublier les encouragements et le soutien de ma famille qui m'ont permis d'arriver où j'en suis aujourd'hui. Merci d'avoir mis toutes ces opportunités sur ma route et de m'avoir constamment encouragée à me dépasser.

## COMITÉ D'ÉVALUATION

### **Directeur**

Ali A. Assani (Ph. D.)

Laboratoire d'hydroclimatologie et de Géomorphologie fluviale et Centre de recherche sur les interactions bassins versants écosystèmes aquatiques (RIVE)

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

### **Membres du comité d'évaluation**

Jean-François Quessy (Ph. D.)

Département de mathématiques et d'informatique

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

Mhamed Mesfioui (Ph. D.)

Département de mathématiques et d'informatique

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été rédigé en conformité avec les dispositions réglementaires concernant la rédaction du mémoire sous forme d'articles scientifiques en vertu des articles 135 à 138 du *Règlement des études de cycles supérieurs* de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). Ce règlement stipule que le travail de recherche effectué dans le cadre d'une maîtrise en sciences de l'environnement peut prendre la forme d'un ou de plusieurs articles scientifiques déjà soumis ou rédigés en vue d'être publiés dans une revue scientifique. Ce mémoire expose la synthèse de mes travaux de recherche qui traitent des caractéristiques de la sécheresse hydrologique des niveaux d'eau moyens annuels du fleuve Saint-Laurent et du lac Ontario en relation avec les indices climatiques.

Le présent document comprend trois chapitres. Le chapitre I décrit la problématique d'ensemble, les objectifs de l'étude et les hypothèses sous-jacentes. Le chapitre II est présenté sous la forme d'un article scientifique intitulé « Comparison of Lake Ontario and St. Lawrence River hydrologic droughts and their relationship to climate indices » qui a été publié dans la revue *Water Resources Research*, une revue interdisciplinaire axée sur l'hydrologie et les ressources hydriques. La réalisation et la rédaction de l'article ont été effectuées en étroite collaboration avec mon directeur de recherche, le Dr Ali A. Assani, le Dr Jean-Jacques Frenette et le Dr Philippe Massicotte. Le chapitre III dresse les principales conclusions de l'étude et dégage les orientations de recherches prometteuses à cet égard.

Conception et idées de recherche : A.A, S.B

Formulation des objectifs et hypothèses : S.B, A.A

Analyses des données : S.B, A.A

Résultats et Discussion : S.B, A.A, J-J.F. et P.M.

Écriture de l'article : S.B, A.A

## RÉSUMÉ

Cette étude avait pour but d'analyser les caractéristiques de la sécheresse hydrologique des niveaux d'eau moyens annuels du fleuve Saint-Laurent et du lac Ontario. Lors du XXe siècle, le continent nord-américain a connu trois grandes périodes de sécheresse qui sont bien documentées. Ce phénomène donne vraisemblablement lieu à des impacts complexes et variés qui se manifestent à diverses échelles temporelles et spatiales. Pour la région des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, les connaissances au sujet de la sécheresse hydrologique sont encore largement méconnues.

Les objectifs spécifiques de cette étude étaient de (1) quantifier le phénomène de sécheresse hydrologique qui affecte les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent et du lac Ontario par l'utilisation de l'ensemble des caractéristiques fondamentales d'une série hydrologique, (2) comparer la variabilité interannuelle des caractéristiques entre les deux écosystèmes aquatiques et (3) déterminer quels facteurs climatiques influencent les caractéristiques de la sécheresse.

Les analyses ont été effectuées sur des séries temporelles de niveaux d'eau moyens annuels du fleuve Saint-Laurent et du lac Ontario sur une période de 93 années, soit de 1918 à 2010. La méthodologie des valeurs seuils proposée par Yevjevich (1967) a été privilégiée pour définir les caractéristiques de la sécheresse hydrologique. Les tests de Lombard (1987), quant à eux, ont été utilisés pour analyser les impacts de la sécheresse sur la tendance à long terme et la stationnarité (moyenne et variance) des séries des niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. L'analyse de la relation entre les indices climatiques et les niveaux d'eau moyens annuels a été précisée au moyen de la méthode d'analyse de corrélation dans le but d'identifier les indices climatiques qui influencent la sévérité de la sécheresse.

Les résultats montrent que les périodes d'occurrences des années de sécheresse entre le Lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent n'ont pas été synchrones. À l'échelle décennale, les résultats révèlent que les années 1930 furent particulièrement sèches pour le lac Ontario. En contrepartie, les décennies 1960 et 2000 se sont avérées des années où la sécheresse hydrologique a sévi pour le fleuve Saint-Laurent. Ces conclusions étaient cohérentes avec les résultats de l'analyse des impacts de la sécheresse sur la tendance à long terme et la stationnarité. Un premier changement de la moyenne de nature abrupte a été observé en 1942-1943 alors qu'un second changement de la moyenne a été détecté pour la période 1930-1931. D'ailleurs, ces analyses suggèrent un changement significatif dans la variance des niveaux d'eau du lac Ontario en 1965-1966. Enfin, l'analyse de la relation entre les indices climatiques a permis de constater que les données d'indices de sécheresse hydrologique des deux plans d'eau sont corrélées aux mêmes indices climatiques, soit l'oscillation Pacifique décennale et l'oscillation Nord-Atlantique, mais que la relation est liée à l'intensité de la sécheresse.

**Mots-clés :** niveaux d'eau, indices climatiques, fleuve Saint-Laurent, lac Ontario, analyses statistiques.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>ii</b>
<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>iv</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES .....</b>	<b>x</b>
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Mise en contexte .....	1
1.1.1 L'hydrosystème des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent .....	1
1.1.1.1 Contexte historique .....	2
1.1.1.2 Économie et commerce.....	2
1.1.1.3 Contexte géologique et géomorphologique .....	4
1.1.1.4 Caractéristiques physiques.....	5
1.1.1.5 Mode de gestion – Plan de régularisation.....	9
1.1.1.6 Climat actuel dans la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent .....	10
1.1.2 Changements climatiques .....	11
1.1.3 Définition de la sécheresse hydrologique .....	14
1.1.4 Les grandes sécheresses en Amérique du Nord .....	15
1.1.5 Impacts de la sécheresse hydrologique dans les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent .....	15
1.1.5.1 Économiques.....	16
1.1.5.2 Santé publique .....	17
1.1.5.3 Récréotourisme .....	18
1.1.5.4 Environnementaux .....	19
1.2 Problématique .....	23
1.3 Objectifs et hypothèses .....	23

1.4	Méthodologie.....	24
1.4.1	Description du site à l'étude .....	24
1.4.2	Analyses statistiques des séries hydrologiques.....	24
1.4.3	Analyse de la relation entre les indices climatiques et les niveaux d'eau moyens annuels .....	25
1.5	Résultats.....	27
<b>CHAPITRE II</b>		
<b>COMPARAISON OF LAKE ONTARIO AND ST. LAWRENCE RIVER HYDROLOGIC DROUGHT AND THEIR RELATIONSHIP TO CLIMATE INDICES .....</b>		<b>30</b>
	Abstract .....	32
	Introduction .....	32
	Methodology .....	34
	Description of study sites.....	34
	Data sources.....	35
	Statistical analysis of hydrologic series .....	37
	Definition of the characteristics of hydrological drought.....	37
	Comparison of the impacts of drought on the stationarity of hydrological series .....	40
	Analysis of the relationship between climate indices and annual mean water levels .....	42
	Results .....	42
	Comparison of the characteristics of hydrological drought for water levels in Lake Ontario and the St. Lawrence River .....	42
	Impacts of drought on the stationarity of annual mean water level series for Lake Ontario and the St. Lawrence River .....	48
	Analysis of the relationship between climate indices and values of DI .....	50
	Discussion and Conclusion .....	54
	Acknowledgments.....	58
	References .....	59
<b>CHAPITRE III</b>		
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>64</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		<b>66</b>



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1	Sommaire des tendances observées des températures, des précipitations et du cycle hydrologique dans la région des Grands Lacs ..... 13
1.2	Sommaire des tendances observées des températures, des précipitations et du cycle hydrologique dans la région du fleuve Saint-Laurent ..... 14
1.3	Détermination des degrés de sévérité de sécheresse en fonction des valeurs de percentiles $P_i$ ..... 25
1.4	Indices climatiques analysés ..... 27
1.5	Comparaison des impacts sur la stationnarité de la sécheresse hydrologique IS ( $IS < 0$ ) pour les niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent (1918-2010)..... 28
1.6	Comparaison des relations entre les indices de sécheresse ( $IS < 0$ ) pour les niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent (1918-2010) et les indices climatiques ..... 29
2.1	The Five Climatic Indexes Used..... 37
2.2	Definition of Drought Severity Levels as a Function of $P_\alpha$ Percentile Values ..... 39
2.3	Analysis of the Stationarity (mean) of Water Level Series for the St. Lawrence River and Lake Ontario (1918-2010)..... 48
2.4	Analysis of the Stationarity (variance) of Water Level Series for the St. Lawrence River and Lake Ontario (1918-2010)..... 49
2.5	Coefficients of Correlation Between Climate Indices and DI Values ( $DI < 0$ ) for Water Levels in Lake Ontario (1918-2010)..... 51
2.6	Coefficients of Correlation Between Climate Indices and DI Values ( $DI < 0$ ) for Water Levels in St. Lawrence River (1918-2010) ..... 51

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Températures hivernales et état des glaces, saison sans gel et masses d'air, températures estivales, précipitations et ceintures de neige .....	11
2.1	Location of the study area.....	35
2.2	Comparison of the total number of dry years ( $DI < 0$ ) for different threshold levels between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010.....	43
2.3	Comparison of the total number of dry years ( $DI < 0$ ) per decade between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010 .....	44
2.4	Comparison of the temporal variability of DI values between Lake Ontario (blue curves) and the St. Lawrence River (red curves) for the period from 1918 to 2010 .....	45
2.5	Comparison of the duration of sequences of consecutive dry years ( $DI < 0$ ) between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010 .....	46
2.6	Comparison of CV values for dry years ( $DI < 0$ ) between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010 .....	47
2.7	Dates of shifts in mean (solid line) and variance (dotted line) of annual mean water levels in Lake Ontario. No shift was found for the St. Lawrence River.....	49
2.8	Relationship between DI values and NAO. A = Lake Ontario (P10); B = St-Lawrence (P20) .....	52
2.9	Comparison of the temporal variability of water levels (A) in Lake Ontario (blue curve) and the St. Lawrence River (red curve) and the four climate indices (B) (AMO, NAO, PDO and SOI) which are significantly correlated to water levels .....	53

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CGLG	Council of Great Lakes Governors
CMI	Commission mixte internationale
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IS	Indice de sécheresse
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSERC	Natural Sciences and Engineering Research Council
OA	Oscillation arctique
ONA	Oscillation Nord-Atlantique
OAM	Oscillation Atlantique multi-décennale
OPD	Oscillation Pacifique décennale
OAU	Oscillation australe
RIVE	Centre de recherche sur les interactions bassins versants écosystèmes aquatiques
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
USACE	United States Army Corps of Engineers
TLM	Threshold level method

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

Cette section du mémoire fait le point des connaissances actuelles sur les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent et sur le phénomène de la sécheresse hydrologique en Amérique du Nord. Quoique la région d'intérêt de la présente étude soit la région du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent, l'ensemble des connaissances concernant la sécheresse des Grands Lacs est présenté, et ce, afin de bien percevoir les tendances à l'échelle du bassin versant. Tout d'abord, les principales caractéristiques historiques, économiques, géologiques et physiques de la région ont été dûment prises en compte pour bien comprendre l'importance que revêt ce système aquatique sur le plan local, national et international. Par la suite, les connaissances sur les principaux facteurs qui influencent l'hydrologie ont été dégagées. Ensuite, les aspects de la sécheresse hydrologique dans le bassin hydrographique et les impacts ont été présentés de manière exhaustive.

#### 1.1.1 L'hydrosystème des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent

L'hydrosystème des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, situé dans le centre nord-est de l'Amérique du Nord, abrite 23 000 km<sup>3</sup> d'eau. Cette quantité représente approximativement 20 % des ressources en eau douce mondiale et en fait la plus grande réserve d'eau potable mondiale (Hunter *et al.*, 2015). Ce pourcentage élevé contribue à la perception d'abondance des ressources hydriques dans la région des Grands Lacs. Cependant, cette conception est erronée. Seulement 1 % des ressources hydriques contenues dans les Grands Lacs peut être considéré comme une ressource renouvelable puisque la masse d'eau qui se trouve dans cette région est un héritage de la période glaciaire (Gössling et Michael, 2006). Son bassin versant couvre une superficie de

766 000 km<sup>2</sup> et occupe une portion des provinces de l'Ontario et du Québec au Canada et une partie des États riverains de l'Illinois, de l'Indiana, du Michigan, du Minnesota, de New York, de l'Ohio, de la Pennsylvanie et du Wisconsin aux États-Unis (CGLG, 2015). De l'amont vers l'aval du système, on retrouve le lac Supérieur, le lac Michigan, le lac Huron, le lac Érié et le lac Ontario. Ce réseau est relié par quatre voies interlacustres : St Marys, St Clair, Détroit et Niagara. Le principal exutoire des Grands Lacs est le fleuve Saint-Laurent qui termine son cours dans l'océan atlantique (Ehsanzadeh *et al.*, 2013).

#### ***1.1.1.1 Contexte historique***

Pendant plus de 10 000 ans, les terres situées en périphérie des Grands Lacs étaient peuplées par différentes nations autochtones. Le 17<sup>e</sup> siècle est marqué par l'exploration européenne de l'estuaire du Saint-Laurent et des Grands Lacs. En empruntant la rivière des Outaouais, la baie Georgienne et le lac Huron furent les premiers à être cartographiées dès 1615 par les explorateurs Samuel de Champlain et Étienne Brûlé. D'ailleurs à partir du lac Simcoe, Brûlé a également exploré le lac Ontario la même année. Les premiers écrits mentionnant le lac Supérieur et le lac Michigan, quant à eux, remontent à 1634 par l'explorateur Jean Nicolet. Enfin, Louis Jolliet, premier explorateur d'envergure natif du Canada, est l'auteur des premiers écrits au sujet du lac Érié (Swackhamer, 2014).

#### ***1.1.1.2 Économie et commerce***

La richesse des ressources naturelles constituait, et constitue toujours, la pierre angulaire de la région des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. Au cours des 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> siècles, le commerce de la fourrure était la principale activité économique du bassin des Grands Lacs. Le bassin représentait non seulement une source d'approvisionnement en fourrures, mais également une route navigable permettant le transport efficace et à faible coût des fourrures. Le déclin de cette activité économique s'est amorcé au début des années 1800 en raison de la surexploitation des mammifères à fourrure (castors,

martres des pins, loups) qui les ont menés près du seuil de l'extinction (Ashworth, 1986).

Par conséquent, on assiste à l'émergence de l'industrie forestière au début des années 1800, ce qui coïncide avec une forte vague d'immigration en provenance d'Europe. Initialement, l'exploitation forestière avait comme unique fonction d'assurer la survie des pionniers. La forêt était défrichée pour l'établissement et l'agriculture et des résidences. Un demi-siècle plus tard, les villes de Détroit, Milwaukee et Chicago enregistraient une forte croissance urbaine qui se manifestait par une montée en flèche de la demande en bois d'œuvre. Chicago connut la plus grande croissance et se hissa au premier rang du marché du bois d'œuvre américain. Jadis, la technologie des transports des billes de bois était dépendante du climat. La matière première était coupée l'hiver lorsque les rondins pouvaient être déplacés facilement sur la glace et la neige et transportés à la métropole, au printemps, par les hautes eaux. Vulnérable aux aléas climatiques, le marché du bois d'œuvre était soumis à une hyper-volatilité des prix. L'avènement du chemin de fer a suscité des changements dans la nature des transports du bois devenant le mode de transport dominant de l'industrie. Après 1860, l'intensité des activités d'exploitation forestières s'était considérablement accrue en raison des avancées technologiques. La production de bois dans la région des Grands Lacs représentait trois à quatre fois la moyenne nationale. En 1920, l'industrie forestière dans la région des Grands Lacs avait atteint son point culminant et périlait puisque la plupart des ressources forestières, antérieures à l'arrivée des Européens, étaient épuisées (Hupy et Antoinette, 2005). Au cours de ces 200 dernières années, les changements observés sont beaucoup plus importants en comparaison aux changements observés par rapport aux 1000 dernières années avant la colonisation. Les superficies forestières de la région des Grands Lacs enregistrent une diminution pouvant atteindre les 40 % et les espaces forestiers restants sont des forêts reconstituées d'espèces pionnières (Cole *et al.*, 1998).

Face à cette nouvelle conjoncture économique, le secteur industriel et le secteur agricole devinrent les forces économiques prédominantes dans le bassin des Grands Lacs

dès 1940. Le minerai de fer du Minnesota pour la production de l'acier, le calcaire et le ciment pour la construction, le charbon du plateau appalachien pour la production d'électricité et le grain destiné à la consommation et aux exportations étaient des ressources naturelles transportées par barges sur les Grands Lacs (USACE, 2009). En 2010, 322,1 millions de tonnes métriques de marchandises ont transité dans les terminaux maritimes et les ports de l'hydrosystème des Grands Lacs et du Saint-Laurent (Martin Associates, 2011).

### ***1.1.1.3 Contexte géologique et géomorphologique***

Les bassins hydrographiques des Grands Lacs sont divisés en deux parties : une région de basses terres au sud qui repose sur des roches sédimentaires à faible pendage du Paléozoïque et une région de hautes terres constituée de granite, de gneiss et de roches métavolcaniques et métasédimentaires d'âge précambrien (Larson et Schaetzl, 2001). D'après l'ouvrage de référence de Botts (1987), durant l'ère paléozoïque, l'Amérique du Nord a été assujettie à des submersions marines répétées qui *« ont déposé des boues calcaires, des argiles, des sables et des sels qui en se consolidant, ont donné des calcaires, des argiles litées, des grès, de l'halite et du gypse »*.

Les vallées creusées par l'action érosive des rivières et torrents furent approfondies et élargies par l'affouillement glaciaire durant les glaciations du pléistocène. En de nombreux endroits, des sédiments quaternaires se sont accumulés dans les Grands Lacs. Ces sédiments suggèrent que la topographie du plancher lacustre n'est pas le produit unique de l'érosion glaciaire, mais également de dépôts glaciaires et postglaciaires. La première extension glaciaire dans la région des Grands Lacs remonterait à 2,4 Ma. Par contre, la majorité de l'activité glaciaire aurait eu lieu, il y a 0,78 Ma, lors de la glaciation maximale en Amérique du Nord. Beaucoup d'incertitudes subsistent en ce qui concerne le nombre de fois que le bassin versant des Grands Lacs fut soumis à l'action de la glaciation. Néanmoins, des observations stratigraphiques suggèrent que l'extension glaciaire totale dans le bassin versant serait survenue au moins à 6 reprises depuis 0,78 Ma (Larson et Schaetzl, 2001).

Après le dernier retrait des glaciers qui libérèrent le sol d'un poids immense, d'importantes quantités d'eau de fonte remplirent les bassins creusés par les glaciers. Occupant autrefois une superficie beaucoup plus vaste, les crêtes de plages anciennes, des falaises érodées et de plaines uniformes sont des structures géomorphologiques du paysage actuel qui témoignent de cette période. L'ajustement glacio-isostatique et les déplacements des fronts glaciaires sont les facteurs à l'origine des différentes caractéristiques physiques (profondeur, taille, système de drainage) des Grands Lacs.

Malgré qu'il ne soit plus aussi prononcé que lors de la déglaciation, le phénomène d'isostasie est observable dans la portion nordique du bassin hydrologique (Botts, 1987). En fait, il a été observé que les débits sortants des lacs Supérieur et Michigan étaient supérieurs en raison de leur taux de réajustement isostatique plus élevé. À l'opposé, les lacs Érié et Ontario enregistrent des taux de réajustement négatifs de sorte qu'ils emmagasinent de l'eau avec le temps. À titre d'exemple, un taux de réajustement isostatique relativement élevé a été enregistré à Michipicoten sur les rives du lac Supérieur. Il en va d'un relèvement approximatif de 23 cm par siècle. Tandis que sur les rives du lac Ontario à Burlington, on estime un affaissement de 20 cm par siècle (Bruxer et Southham, 2008).

#### ***1.1.1.4 Caractéristiques physiques***

Quoique faisant partie d'un seul et même système, chaque lac possède des caractéristiques uniques. Le lac Supérieur se démarque comme étant le plus grand en termes de superficie (82 100 km<sup>2</sup>) et de volume (12 000 km<sup>3</sup>). Alimentée par plus de 300 cours d'eau, la rivière Nipigon constitue le plus important tributaire du lac Supérieur. Très profond, il affiche une profondeur maximale de 405 m et une profondeur moyenne de 147 m. Ces caractéristiques physiques expliquent la longue période de rétention du plan d'eau estimé à 191 ans (Botts, 1987). Contrairement aux autres Grands Lacs qui devinrent eutrophes au cours du 20<sup>e</sup> siècle, le lac Supérieur se classe toujours, quant à lui, dans le niveau trophique oligotrophe (Shaw Chraïbi *et al.*, 2014). En raison de son grand volume, le lac Supérieur est doté d'une grande capacité



thermique. Ainsi, la couverture des glaces atteint rarement la superficie entière du lac. Les observations passées indiquent que la superficie du lac Supérieur était gelée à 100 % en une seule occasion, soit à l'hiver 1979 (Olivier, 2015).

Le lac Michigan est situé entièrement aux États-Unis et occupe le deuxième rang pour sa taille après le lac Supérieur. Le lac a une superficie de 57 800 km<sup>2</sup>, une profondeur moyenne de 85 m et un volume estimé de 4920 m<sup>3</sup>. Le bassin hydrographique se caractérise par sa forte urbanisation. En 2014, 8 millions d'Américains dépendaient du lac pour leurs besoins en eau. En fait, deux grandes agglomérations se sont développées sur le pourtour du lac Michigan : Chicago, au sud-ouest du lac et Milwaukee, seulement 150 km au nord de la précédente (Swackhamer, 2014). C'est de longue date que les activités anthropiques dans ce bassin exercent une pression accrue sur l'écosystème aquatique. Dans les années 1800, Chicago construit un système d'égouts unitaires qui transportait les débits à la fois des eaux pluviales et des eaux usées. Les effluents du réseau se déversaient dans la rivière Chicago qui alimentait le lac Michigan. Cela va sans dire que lors d'intempéries, les débordements d'égouts unitaires contaminaient les sources d'approvisionnement en eau potable situées dans le lac Michigan. D'ailleurs, la pollution provenant des surverses de réseaux unitaires a contribué à la situation épidémiologique liée à la fièvre typhoïde en 1891. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'ambitieux projet, piloté par le Sanitary District of Chicago, d'inverser le cours d'eau de la rivière Chicago vers la rivière du Mississippi (Cole *et al.*, 1998). Depuis désormais plus d'un siècle, les eaux polluées de la rivière Chicago n'alimentent plus le bassin versant des Grands Lacs. Néanmoins, la gestion de la qualité et de la quantité des eaux de ruissellement urbaines demeure un défi environnemental majeur dans le bassin versant du lac Michigan.

Le troisième lac, par ordre de taille, est le lac Huron qui comprend la baie Georgienne. Son étendue se situe entre l'État américain du Michigan et la province canadienne de l'Ontario. Il représente la section centrale des Grands Lacs. Il couvre 59 600 km<sup>2</sup> et contient 3 538 km<sup>3</sup> d'eau. Il possède une profondeur moyenne de 59 m et une profondeur maximale de 229 m (Swackhamer, 2014). Les plages de sable peu

profondes et les rives rocheuses du lac Huron constituent des lieux de villégiature très prisés de nombreux Canadiens et Américains. Quant au bassin de la rivière Saginaw qui forme un prolongement peu profond du lac Huron, il possède une vocation surtout agricole. À ce même endroit, on retrouve une réserve de ressources halieutiques très importante (Botts, 1987). Les eaux lacustres libres du lac Huron sont caractérisées d'eaux oligotrophes. Par contre, la baie de Saginaw est un milieu récepteur d'importantes charges de contaminants. Les eaux de cette zone sont classées eutrophes (Martin Associates, 2011).

D'une surface de 25 700 km<sup>2</sup> et d'assez faible profondeur (19 m en moyenne, 64 m au maximum), le lac Érié est le plus petit en superficie des Grands Lacs. Ses caractéristiques en font un bassin hydrologique vulnérable à l'urbanisation et à l'agriculture. D'ailleurs, le lac se trouve au cœur d'une zone agricole intensive et 17 municipalités de plus de 50 000 habitants sont situées dans son bassin de drainage. Les États riverains sont l'Ohio, la Pennsylvanie et New York au sud, le Michigan à l'ouest et la province canadienne de l'Ontario au nord (Botts, 1987). Les apports en eau proviennent majoritairement de la rivière Détroit qui est reliée au lac Huron. On compte seulement quatre autres tributaires majeurs (plus de 1000 ft<sup>3</sup>/s) : la rivière Maumee, la rivière Grand, la rivière Thames et la rivière Sandusky. Du fait de sa petite taille, les pertes d'eau par évaporation dans le lac Érié sont les plus accrues par rapport aux Grands Lacs. Cette perte est estimée à 85 cm par année. Aussi, il possède la plus courte période de rétention du plan d'eau, estimée à 2,6 ans (Bruxer et Southam, 2008).

Le lac Ontario couvre 18 960 km<sup>2</sup> et se situe en aval des Grands Lacs. Malgré sa petite superficie, le lac est très profond, affichant une profondeur maximale de 244 m. Étant donné sa grande capacité thermique, la couverture des glaces est rarement observée sur l'entière surface du lac. L'aire de drainage du bassin hydrographique a une superficie de 75 272 km<sup>2</sup>. Le principal tributaire du lac Ontario est la rivière Niagara qui compte pour environ 80 % de ses apports en eau. Le temps de résidence des eaux dans le lac Ontario est compris entre 6 et 8 ans. Son exutoire est le fleuve Saint-Laurent (Larson et Schaetzel, 2001). La forêt prédomine dans l'utilisation du sol; elle occupe près de

49 % du bassin versant du lac Ontario. L'agriculture occupe également une proportion importante (39 %) dans le bassin versant. La portion urbanisée représente 7 % du territoire. Approximativement 6 millions de personnes y résident dont 70 % se trouvent dans la province de l'Ontario. Les effets de cette urbanisation se sont fait sentir dès la fin des années 1960. Au début des années 1970, un cri d'alarme est lancé au sujet de la dégradation de la qualité de l'eau du lac Ontario. Plusieurs mesures de prévention de l'eutrophisation ont été adoptées, en 1972 par le biais de l'Accord relatif à la qualité de l'eau dans les Grands Lacs, pour renverser la tendance, notamment des mesures portant sur la réduction des apports de phosphore (Environnement Canada, 2013). Au cours des deux dernières décennies, des réductions significatives des quantités de phosphores ont été observées dans le lac Ontario. D'ailleurs, on observe graduellement un retour vers l'oligotrophie et une augmentation considérable de la qualité de l'eau (Beaulieu *et al.*, 2008).

Le fleuve Saint-Laurent tire sa source des Grands Lacs, plus précisément du lac Ontario où 60 % de l'eau du fleuve y provient. Il figure parmi les plus grands fleuves au monde. Deuxième fleuve en importance en Amérique de Nord en termes de débits, il se positionne au 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> rang mondial respectivement pour son bassin de drainage et son débit moyen. Le débit quotidien de décharge du fleuve varie entre 9000 et 26 000 m<sup>3</sup>/s à son embouchure (Talbot, 2006).

Il s'agit d'un écosystème complexe qui comprend, entre autres, des lacs fluviaux, des voies interlacustres et des milieux humides. Au total, le bassin de drainage du fleuve Saint-Laurent représente une superficie qui s'élève à 1 600 000 km<sup>2</sup> (Millerd, 2011). Traversant le Québec d'ouest en est, il compte 244 tributaires réparties dans son bassin versant. Les principaux affluents sont la rivière des Outaouais, sur sa rive nord, et la rivière Richelieu sur sa rive sud (Ficke *et al.*, 2007).

### ***1.1.1.5 Mode de gestion – Plan de régularisation***

Le fleuve Saint-Laurent et le lac Ontario ont été affectés par de grands travaux d'aménagements d'origine anthropique depuis le 19<sup>e</sup> siècle, mais c'est au cours du 20<sup>e</sup> siècle que des travaux majeurs ont été entrepris (Morin et Leclerc, 1998). En effet, pour répondre aux besoins de la navigation commerciale internationale, on entreprit le creusement d'un long canal à travers le chenal du fleuve Saint-Laurent et les Grands Lacs en 1954. La Voie maritime du Saint-Laurent a été inaugurée en 1959. Ce grand canal est une voie navigable longue de 3700 km qui relie l'Océan Atlantique aux Grands Lacs. Il comprend au total 19 écluses et plusieurs barrages qui régulent les niveaux d'eau du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent (Ficke *et al.*, 2007). En 2010, plus de 35 millions de tonnes métriques de marchandises ont transigé sur la Voie maritime du Saint-Laurent (Martin Associates, 2011).

Les niveaux d'eau du lac Ontario et les eaux qui s'en écoulent sont régularisés selon le Plan 1958-D recommandé par la Commission mixte internationale (CMI) lors de la construction de la voie maritime. Ce plan, adopté en 1963, vise à assurer une gestion harmonieuse des eaux internationales en fonction des multiples intérêts et besoins des utilisateurs du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent, notamment les riverains, les producteurs d'électricités et les navigateurs commerciaux et de plaisance. Il découle du plan 1958-D un calcul d'écoulement de base régularisé auquel on applique des ajustements saisonniers et des modifications pour répondre à certaines mesures et des objectifs précis. À titre d'exemple, le plan assure des débits saisonniers minimaux afin qu'il n'y ait pas d'interruption dans la production d'hydroélectricité. Aussi, le débit maximum régularisé du lac Ontario est maintenu le plus bas possible afin d'assurer des vitesses sécuritaires aux fins de la navigation commerciale et de plaisance (Wall, 1998). Plus particulièrement, le Plan 1958-D a été conçu pour faire face à des périodes prolongées d'apports en eau supérieurs aux besoins et pour permettre une certaine latitude à l'exercice d'un pouvoir discrétionnaire lors de conditions extrêmes qui menace la sécurité publique. Entre autres, lors des conditions de niveaux d'eau élevés inhabituels en 1985-1986, on a conféré un pouvoir discrétionnaire pour réduire les niveaux d'eau du

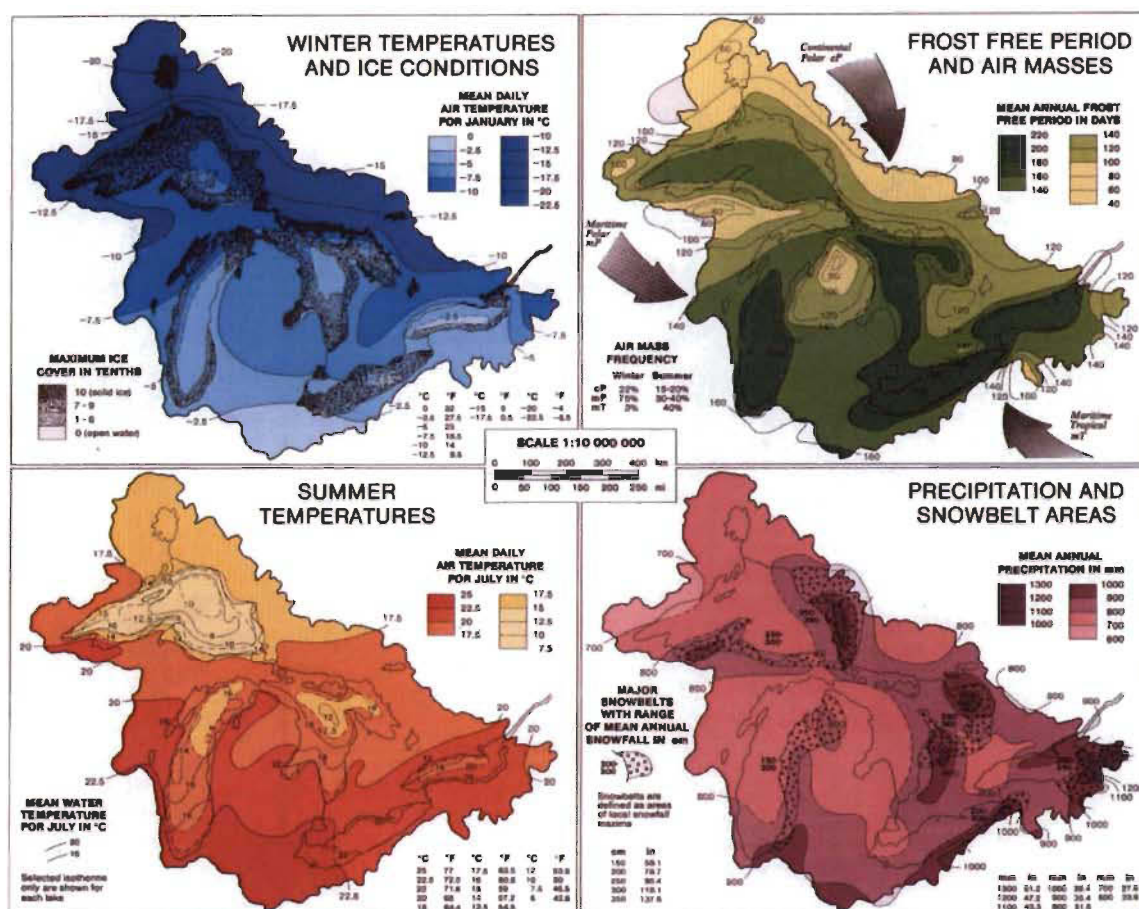
lac Ontario de 0,76 m afin de prévenir des inondations en aval. Par contre, le plan présente plusieurs lacunes, notamment pour faire face à des niveaux d'eau très bas. Dans cet ordre d'idées, le plan a été révisé à quatre reprises depuis son adoption pour y inclure des considérations environnementales (Talbot, 2006). En ce qui concerne les barrages, ils furent érigés sur le cours du fleuve dans le tronçon fluvial situé entre les villes de Cornwall et Montréal. Les principaux barrages sont : Moses-Saunders, Long Sault, Iroquois, Beauharnois-Les Cèdres. Les installations de Moses-Saunders et de Beauharnois-Les Cèdres régularisent les niveaux d'eau du lac Saint-François qui varient seulement de 15 cm annuellement. Outre ces barrages, le principal affluent du fleuve, la rivière des Outaouais qui draine un bassin versant de 143 000 km<sup>2</sup>, est fortement régularisé. Ce cours d'eau alimente le fleuve par le biais du lac des Deux Montagnes. On y a construit de nombreux réservoirs capables de stocker beaucoup d'eau au printemps. Ces réservoirs provoquent ainsi une baisse significative des débits en aval. En revanche, ils provoquent une hausse significative des débits en hiver induisant ainsi une inversion totale du cycle naturel annuel des débits (Assani, Gravel *et al.*, 2005; Assani, Stichelbout *et al.*, 2006; Lajoie, Assani *et al.*, 2007; Matteau, Assani *et al.*, 2009). Les effets de cette inversion peuvent se maintenir jusqu'aux confluences des affluents avec le fleuve Saint-Laurent. Dans le cas de la rivière Saint-Maurice (43 000 km<sup>2</sup>), un des principaux affluents du fleuve en rive nord, ses apports en eau au fleuve ont diminué de plus de 60 % au printemps alors qu'ils ont augmenté de 20 % en hiver en raison de la présence des réservoirs (Vadnais *et al.*, 2012).

#### ***1.1.1.6 Climat actuel dans la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent***

La région des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent bénéficie d'un climat tempéré. Le régime des vents se caractérise par des vents dominants qui proviennent de l'ouest et une alternance de masses d'air humide et chaud en provenance du golfe du Mexique d'une part et de masses d'air froid soufflant de l'Arctique d'autre part. Également, les cinq lacs exercent une influence sur le climat régional en raison des flux de chaleur et d'humidité au-dessus de ces plans d'eau. Les lacs restituent la chaleur mise en réserve durant l'été et adoucissent les températures hivernales. La capacité thermique



des Grands Lacs explique également l'arrivée tardive du printemps. Notamment, des précipitations abondantes peuvent se produire en hiver en raison de l'effet de lac (Botts, 1987).



**Figure 1.1** Températures hivernales et état des glaces, saison sans gel et masses d'air, températures estivales, précipitations et ceintures de neige (Tirée de Botts, 1987).

### 1.1.2 Changements climatiques

Il existe désormais un large consensus concernant les enjeux des changements climatiques et leurs incidences environnementales sur la planète. Dans une étude publiée en janvier 2014 par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies, les preuves des changements climatiques sont sans équivoque et la cause est imputable aux activités anthropiques. Peu après,

l'administration américaine a publié le troisième rapport d'évaluation sur les changements climatiques. Ce rapport confirme que les Américains et les secteurs clés de l'économie sur l'ensemble du pays sont touchés par les changements climatiques. L'examen des diverses tendances concernant les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent au regard de changements climatiques appréhendés fait l'objet d'une littérature sans cesse croissante. Les principales tendances concernent plus spécifiquement la température, les précipitations et le cycle hydrologique (Melillo *et al.*, 2014). Les tableaux 1.1 et 1.2 regroupent les principales tendances observées pour la région des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent.

Les impacts des changements climatiques sont étroitement liés aux forces qui influencent les niveaux d'eau dans l'hydrosystème des Grands Lacs et du Saint-Laurent. L'augmentation des températures aura globalement comme conséquence une diminution des apports hydriques aux lacs par l'augmentation de l'évapotranspiration et la transpiration (Bartolai *et al.*, 2015). À ce propos, Magherebi *et al.* (2015) indiquent : « *qu'une hausse des températures peut entraîner des augmentations de pertes d'eau par évaporation et des augmentations du taux de fonte du couvert de glace* ». Un déficit récurrent en eau dans les Grands Lacs pourrait se traduire par une diminution du débit du fleuve jusqu'à 40 % par rapport à la moyenne à long terme, c'est-à-dire une diminution de 1,3 m des niveaux d'eau à Montréal (Mortsch et Quinn, 1996).

**Tableau 1.1**

Sommaire des tendances observées des températures, des précipitations et du cycle hydrologique dans la région des Grands Lacs

Indicateurs	Période	Référence(s)
<i>Température</i>		
Augmentation des températures moyennes annuelles de l'air de 0,7 °C	1895-1999	Hall <i>et al.</i> , 2007
Diminution du nombre de jours avec des températures basses extrêmes	1900-1998	Bonsal <i>et al.</i> , 2001 et Brown <i>et al.</i> , 2010
Augmentation du nombre de jours avec des températures élevées extrêmes	1900-1998	Bonsal <i>et al.</i> , 2001 et Brown <i>et al.</i> , 2010
<i>Précipitations</i>		
Augmentation des précipitations totales annuelles de 10,7 cm (~13 %)	1955-2004	Hodgkins <i>et al.</i> , 2007
Augmentation de la fréquence de fortes précipitations estivales	1895-1996	Stone <i>et al.</i> , 2000
Diminution des précipitations totales annuelles de neige	1900-1998	Zhang <i>et al.</i> , 2000
<i>Cycle hydrologique</i>		
Diminution de l'étendue de la couverture de neige et de glace et sa durée	1975-2004	Jensen <i>et al.</i> , 2007
Tendance à la baisse des niveaux d'eau	1860-2006	Sellinger <i>et al.</i> , 2008 et Lamon et Stow, 2010
Augmentation de l'évapotranspiration	1948-2008	International Upper Great Lakes Study, 2012



**Tableau 1.2**

Sommaire des tendances observées des températures, des précipitations et du cycle hydrologique dans la région du fleuve Saint-Laurent

Indicateurs	Période	Référence(s)
<i>Températures</i>		
Augmentation des températures annuelles moyennes de 0,8 °C	1971-2000	Côté <i>et al.</i> , 2014
Diminution du nombre de jours avec des températures basses extrêmes	1951-2010	Donat <i>et al.</i> , 2013
Augmentation du nombre de jours avec des températures élevées extrêmes	1951-2010	Donat <i>et al.</i> , 2013
<i>Précipitations</i>		
Augmentation des précipitations sous forme de pluie au printemps et à l'automne	1950-2011	Côté <i>et al.</i> , 2014
Diminution des précipitations sous forme de neige à l'hiver	1950-2011	Côté <i>et al.</i> , 2014
<i>Cycle hydrologique</i>		
Aucune tendance statistiquement significative n'est encore observable dans l'évolution du débit moyen annuel du fleuve Saint-Laurent	1932-2010	MDDELCC, 2014

### 1.1.3 Définition de la sécheresse hydrologique

En dépit des efforts consentis jusqu'ici, plusieurs ambiguïtés subsistent en ce qui concerne la définition de la sécheresse hydrologique. Considérant la différence entre les variables hydrométéorologiques et les facteurs socioéconomiques, la nature stochastique de la demande en eau et l'absence d'une méthodologie uniforme, il paraît dès lors difficile d'élaborer une définition précise et universelle de ce phénomène hydrologique (Yevjevich, 1967). D'ailleurs, parmi l'ensemble des menaces naturelles, la sécheresse se

distingue par sa durée et par sa difficulté à circonscrire l'évènement dans le temps et l'espace. Les experts s'entendent toutefois pour dire qu'il est question de sécheresse hydrologique lorsque les niveaux d'eau ou les débits observés au cours d'une période sont inférieurs à une valeur-seuil donnée (Mishra et Singh, 2010).

#### **1.1.4 Les grandes sécheresses en Amérique du Nord**

En Amérique du Nord, on distingue trois grandes périodes de sécheresse continue. La première période de sécheresse est survenue durant la décennie 1930. Elle a eu des répercussions sur plus des deux tiers des États-Unis ainsi qu'une partie de l'ouest du Canada. Par contre, la région continentale des États-Unis, les Grandes Plaines et les Prairies canadiennes adjacentes furent principalement affectées par cette sécheresse. Une analyse réalisée sur les séries hydrologiques historiques de la décennie 1930-1940 a révélé que les niveaux d'eau au port de Montréal étaient, durant 5 années, inférieurs au niveau de référence établie dans le Plan 1958-D, et ce, pour des périodes variant entre 20 à 28 semaines (Mortsch *et al.*, 2000). La seconde période de sécheresse se situe à fin des années 1950 et le début de la décennie 1960. Selon les mêmes auteurs, cette sécheresse fut ressentie sur l'ensemble des États-Unis et du Canada, mais elle toucha principalement le sud des États-Unis et, encore une fois, les Grandes Plaines et les Prairies canadiennes (Schubert *et al.*, 2004). Enfin, la troisième période de sécheresse se produisit au début de la décennie 2000. D'après Cook *et al.* (2007), la partie occidentale des États-Unis subit les effets d'une sécheresse sévère depuis 1999. Ces impacts s'atténuent depuis peu (2005). Également, cette période a été décrite dans d'autres régions d'Amérique du Nord (Schabbar et Skinner, 2004).

#### **1.1.5 Impacts de la sécheresse hydrologique dans les Grands Lacs et le fleuve Saint-Laurent**

Manifestement, la sécheresse hydrologique dans la région des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent donne lieu à des impacts complexes et variés qui se manifestent à diverses échelles temporelles et spatiales. Plusieurs conclusions d'études sur les impacts

de la sécheresse hydrologique convergent dans le même sens. Ces résultats permettent de dégager les principales répercussions économiques, sociales et environnementales anticipées dans l'hydrosystème.

#### ***1.1.5.1 Économiques***

##### *Production d'hydroélectricité*

Le Canada et les États-Unis dépendent des ressources hydrauliques des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent pour leur production d'électricité. Les types d'installation varient dans l'écosystème, allant d'une centrale hydraulique de basse chute de la rivière Ste-Marie, à une centrale hydraulique de haute chute dans le fleuve Saint-Laurent. Des apports hydrauliques inférieurs, consécutifs à une période de sécheresse, entraîneraient une réduction de la production hydroélectrique. À cet égard, des pertes économiques de 19 % à 26 % liées à la production d'hydroélectricité furent enregistrées dans les années 1960 sur la rivière Sainte-Marie et sur le fleuve Saint-Laurent en raison des faibles débits (Talbot, 2006). Alors que la capacité de production électrique décroît en période de sécheresse, il a été révélé que la demande en énergie durant ces périodes s'intensifie. L'énergie nécessaire pour la climatisation et les pompes à eau de refroidissement se traduit par une pression supplémentaire dans le secteur de la production hydroélectrique. Fait notable, la consommation d'électricité dans la province de l'Ontario a atteint un niveau historique durant le mois de juillet 1988. Confrontée à une vague de sécheresse hydrologique et des températures élevées, la province a été touchée par des coupures de courant et Hydro-Ontario a lancé un appel au public en vue de réduire la consommation (Gössling et Michael, 2006).

##### *Navigation commerciale*

La sécheresse hydrologique peut nuire à l'industrie maritime sur les Grands Lacs de multiples façons. Lorsque les navires marchands circulent dans les Grands Lacs, ils doivent respecter des normes de dégagement net sous quilles. Selon Beaulieu *et al.* (2008), le dégagement net sous quilles se définit essentiellement comme « *la distance*

*entre la profondeur nominale du chenal et la partie la plus basse de la quille du navire lorsqu'il est à l'arrêt en eaux calmes* ». La compétitivité et la rentabilité sont compromises par des niveaux d'eau plus faibles qui résultent en une diminution de la capacité de chargement des navires et la réduction de la vitesse pour préserver un dégagement sous quilles suffisant afin d'assurer le passage sécuritaire (Millerd, 2011). En 1964, des navires transportant du minerai de fer et des grains à partir du nord du lac Supérieur à la région inférieure des Grands Lacs se sont vus obligés de réduire leur tonnage de 725 à 1360 tonnes pour pouvoir transiter par la rivière Sainte-Claire (Gabriel et Kreutswiser, 1993).

#### **1.1.5.2 Santé publique**

L'approvisionnement en eau potable constitue un enjeu de santé publique de premier ordre. La capacité de production des installations municipales d'alimentation en eau à des fins domestiques dépend de la capacité nominale des stations de traitement de l'eau et l'emplacement des ouvrages de captation par rapport aux niveaux d'eau. Parmi les répercussions anticipées en matière d'approvisionnement en eau potable lors de conditions de sécheresse hydrologique, on note notamment des interruptions dans l'approvisionnement en eau potable en raison d'une hauteur d'eau insuffisante au-dessus des prises d'eau ainsi qu'une réduction du pouvoir de dilution de l'eau entraînant la diminution de la capacité nominale des stations d'épurations, mais également une augmentation de la demande en eau potable en période pointe (Mailhot *et al.*, 2008). Bibeault et Doyon (2006) indiquent dans leur étude que la région du tronçon fluvial située entre le lac Saint-François et la pointe est de l'île de Montréal comprend 16 stations de filtration d'eau potable qui desservent une population de 2,1 millions de personnes. De ce nombre, 8 stations de filtration d'eau, desservant une population de 200 000 personnes, sont vulnérables à la baisse des niveaux d'eau. La même étude a révélé que dans la région de Montréal, 495 000 résidents sont aux prises avec des problèmes récurrents d'altération du goût ou de l'odeur de l'eau potable. Notons que la prolifération des algues est favorisée par des conditions de sécheresses et que les problèmes d'altération du goût et de la couleur peuvent être associés à la décomposition

des plantes et des algues. Ainsi, une accentuation de l'intensité et de la récurrence de ces événements engendrait des traitements additionnels pour assurer une eau potable adéquate (Talbot, 2006).

#### ***1.1.5.3 Récréotourisme***

La présence d'un plan d'eau bonifie la quasi-totalité des activités récréotouristiques relatives à l'eau. Les activités impliquant un contact direct avec l'eau (baignade, pêche, planche à voile, motomarine, navigation de plaisance, ski nautique) nécessitent une eau de qualité. Également, l'eau a une incidence indirecte sur plusieurs activités récréotouristiques qui n'impliquent pas un contact direct avec l'eau. Les rives des plans d'eau représentent un fort potentiel pour le récréotourisme. Il s'ensuit que les répercussions de la sécheresse hydrologique affectent inévitablement le secteur récréotouristique (Wall, 1998). La région des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent est un endroit de prédilection pour les activités touristiques et récréatives. On estime à 6 millions le nombre de bateaux de plaisance dans la région et plus de 700 marinas le long des rives des Grands Lacs. Selon les résultats d'une enquête effectuée en 1992 auprès des exploitants de marina et plaisanciers canadiens, deux répondants sur trois affirment avoir éprouvé des difficultés à accéder aux quais et aux rampes de mise à l'eau en raison des faibles niveaux d'eau. Les propriétaires de marinas ont dû engager des dépenses pour des stratégies d'adaptations telles que le dragage, l'ajustement des quais et subir des pertes en raison des restrictions liées à la taille des bateaux loués (Gössling et Michael, 2006). Une fois de plus, les faibles niveaux d'eau des années 2000 ont eu des impacts préjudiciables sur le secteur récréotouristique de la région des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. En effet, Pêches et Océans Canada a créé le Programme d'intervention en cas d'urgence - Niveau d'eau des Grands Lacs et a injecté 15 millions de dollars pour les marinas vulnérables à la baisse des niveaux d'eau (Environnement Canada, 2014). Selon un autre point de vue, des étiages sévères ont des incidences importantes sur les milieux riverains dans lesquels les chasseurs, les pêcheurs et les ornithologues pratiquent des activités touristiques et récréatives. Une étude de cas réalisée au Parc national de la Pointe-Pelée, qui se trouve sur les rives du lac Érié,

confirme les préoccupations du secteur du tourisme face à la vulnérabilité des milieux riverains lors de conditions de sécheresse. Le Parc National de la Pointe-Pelée est classé parmi les 10 meilleurs endroits pour l'observation d'oiseaux en Amérique du Nord. Annuellement, le parc attire 60 000 touristes ce qui engendre des retombées économiques évaluées à 4 millions de dollars américains. Étant donné que l'habitat des sauvagines à cet endroit se caractérise par des étangs et des marais qui se sont développés à l'intérieur des cordons sablonneux, le milieu humide ne peut pas évoluer en direction du lac. Des niveaux d'eau insuffisants se traduisent par un assèchement du milieu riverain, une diminution de la diversité des espèces de plantes des milieux humides et une diminution des populations d'oiseaux (Gössling et Michael, 2006; Wall, 1998).

#### ***1.1.5.4 Environnementaux***

##### *Température de l'eau*

Des conditions de sécheresse hydrologique engendrent une augmentation de la température de l'eau qui pourrait donner lieu à des modifications significatives dans l'écosystème des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. Des impacts, au niveau de la stratification thermique, pourraient se manifester par une précocité du mélange printanier et une tardiveté du mélange automnal affectant les concentrations en oxygène des Grands Lacs (Mailhot *et al.*, 2008). Un appauvrissement en oxygène a des répercussions négatives sur la distribution des communautés de poissons. D'un point de vue physiologique, la température de l'eau influence toutes les fonctions vitales des poissons. L'altération des fonctions physiologiques telles la tolérance thermique, la croissance, le métabolisme, l'alimentation, la reproduction et le maintien de l'équilibre homéostatique sont envisageables (Ficke *et al.*, 2007). Parmi les mesures d'adaptation, une migration vers le nord des espèces d'eau froide et des changements dans l'abondance relative et la productivité des communautés halieutiques sont prévus dans les Grands Lacs (Talbot, 2006). Pour le fleuve Saint-Laurent, une corrélation négative est observée ( $r = 0,61$ ;  $p = 0,009$ ) entre la température moyenne de l'eau en été et le

débit saisonnier. Cette relation suggère que les années de sécheresse hydrologiques sont souvent liées à des températures de l'eau plus élevées. Toutefois, les fluctuations des températures de l'eau dans le fleuve ne sont pas réparties également. En période estivale, le cours d'eau principal se caractérise par une température moyenne de 26 °C. La zone littorale, quant à elle, atteint des températures plus élevées, soit de 30 °C. On indique même que des températures de 34 °C ont été enregistrées dans les zones d'herbiers peu profonds lors des conditions de sécheresse. Dans ce contexte, des changements dans les patrons de migrations et la distribution spatio-temporelle des poissons qui ne possèdent pas une tolérance thermique suffisante pourraient survenir (Talbot, 2006). Les espèces d'eau chaude indigènes et les espèces non indigènes seront favorisées par un gain d'habitats, tandis que les espèces d'eau froides subiront un stress croissant et une diminution des habitats aquatiques (Bartolai *et al.*, 2015). Parallèlement, il convient de noter que la toxicité relative des polluants communs (organophosphorés et métaux lourds) pour les organismes aquatiques augmente à des températures plus élevées. Plusieurs études mettent en relief l'existence d'une corrélation positive significative entre la température et la bioaccumulation des polluants organiques persistants (Ficke *et al.*, 2007). Ces impacts concernent non seulement les espèces d'eaux froides, mais l'ensemble des populations halieutiques.

### *Qualité de l'eau*

Les sécheresses provoquent des perturbations dans le cycle hydrologique qui influent sur les déterminants de la qualité de l'eau de diverses façons. Concernant plus spécifiquement les débits et les niveaux d'eau, les résultats de Mosley (2015) suggèrent que les périodes de sécheresse caractérisées par de faibles débits et de faibles niveaux d'eau augmentent le temps de séjour de l'eau et diminuent le taux de renouvellement de plans d'eau. Également, la réduction des niveaux d'eau et des débits affecte la vitesse des processus notamment la production primaire, la respiration et la réaération naturelle. Les concentrations en nutriment peuvent s'élever durant une période de sécheresse hydrologique dans les plans d'eau où la capacité de dilution est moindre et lorsque les charges de nutriments provenant de sources ponctuelles et diffuses demeurent constantes

au cours de cette période. D'ailleurs, il a été démontré que l'enrichissement en nutriments de l'eau favorise la croissance de la plupart des espèces de cyanobactéries dont certaines peuvent produire des toxines potentiellement dangereuses. Selon l'analyse des impacts de la sécheresse sur la qualité de l'eau dans les systèmes d'eau douce menée par Mosley (2015), la majorité des études recensées ont corroboré l'augmentation des concentrations de chlorophylle et d'espèces d'algues dans les réservoirs et lacs pendant les périodes de sécheresse hydrologique (Mosley, 2015). Enfin, les faibles débits et niveaux d'eau ont aussi une incidence sur la fréquence et la magnitude des processus et les taux de transport des sédiments. Boyer *et al.* (2010) ont estimé qu'une diminution des débits, particulièrement au printemps, affectera la taille des particules transportées, les volumes de sédiments et les patrons de dépôts de sédiments. Ainsi, de plus faibles débits favoriseraient une sédimentation des matières en suspension localisée à la confluence des tributaires et du fleuve Saint-Laurent. Les modifications hydrologiques conjuguées aux modifications géomorphologiques auraient des conséquences sur l'état des écosystèmes aquatiques et riverains. Selon les travaux publiés par Environnement Canada (EC) et par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) dans le cadre de la nouvelle Entente Canada-Québec sur le Saint-Laurent, les années marquées par une faible hydraulité peuvent entraîner une réduction de moitié de la capacité de transport des sédiments. Ainsi, en 1999 et en 2001, le fleuve a exporté 4 millions de tonnes de sédiments vers son embouchure par comparaison aux années 1996 et 1997 pour lesquelles la charge sédimentaire annuelle transportée est pratiquement doublée. Enfin, lors de longues périodes d'étiage, la remonte rapide des niveaux d'eau peut accroître les problèmes d'érosion ou créer de nouveaux foyers d'érosion sur le tronçon fluvial dont les berges argileuses sont plus vulnérables à l'érosion une fois qu'elles sont asséchées (MDDELCC, 2014).

### *Milieux humides*

Les milieux humides des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent sont des écosystèmes dynamiques et des zones transitoires entre les milieux terrestres et les



milieux aquatiques. Lors des périodes d'étéages, les plantes des milieux humides se déplacent le long du gradient d'humidité qui part du plan d'eau jusqu'aux milieux secs. Une faible pente, l'absence de barrière naturelle ou anthropique et un substrat approprié sont les conditions qui doivent être réunies pour que cette adaptation soit possible. Hudon (1997) a réalisé une étude exhaustive sur la relation entre les fluctuations d'eau et les milieux humides du fleuve Saint-Laurent. L'étude indique, au nombre de ses conclusions clés, que le temps de réponse des communautés de végétation émergente est étroitement lié à leur système racinaire. Les espèces végétales de marais possèdent une meilleure résistance au stress hydrique grâce à leurs structures racinaires développées par rapport aux plantes flottantes ou immergées compte tenu de leurs systèmes racinaires plus limités. L'auteur souligne également l'impact des étéages sévères sur la composition des espèces de milieux humides du fleuve Saint-Laurent. En cas de stress hydrique, la végétation existante du haut de la chaîne végétale des marécages meurt libérant de l'espace en marge du milieu humide. Ces zones perturbées représentent un endroit potentiel de colonisation par des espèces envahissantes ou exotiques susceptibles de porter gravement atteintes à la biodiversité. D'ailleurs, pendant les années 1930, des niveaux d'eau faibles et des changements dans la composition des espèces des milieux humides ont été observés pour le fleuve Saint-Laurent. Ces changements ont donné lieu au déclin des espèces indigènes *Equisetum fluviatile*, *E. littorale*, *E. palustre* et *Chara* et l'accroissement floristiques des espèces invasives *P. arundinacea*, *B. umbellatus* et *A. gramineum*. Hudon (1997) met en exergue que la biodiversité des milieux humides est aussi importante, sinon plus, que la quantité de biomasse. Des changements du même ordre auraient également été observés dans la région des Grands Lacs. Wilcox *et al.* (2003) mentionnent que l'abondance de *P. australis* dans la baie Long Point présente une corrélation négative avec les niveaux d'eau du lac Érié. Ainsi, l'abondance de *P. australis* était plus élevée pendant les années 1960 et la fin des années 1990, des années où les niveaux d'eau se trouvaient sous la moyenne.

### 1.3 Problématique

Des recherches élaborées ont été effectuées au sujet de la sécheresse hydrologique dans diverses régions climatiques du globe (Goodrich, 2007; Mishra et Sing, 2010; Vincente-Serrano *et al.*, 2012). Parmi ces recherches, la quantification des impacts environnementaux engendrés par un phénomène de sécheresse hydrologique sévère n'a jamais été réalisée par l'utilisation de l'ensemble des caractéristiques fondamentales d'une série hydrologique. D'un point de vue écologique, l'introduction du « paradigme des régimes hydrologiques naturels » a démontré que pour déterminer les changements qui affectent les débits et les conséquences environnementales, et cela, dans une perspective de développement de solutions pour la restauration de l'intégrité écologique des écosystèmes fluviaux, toutes les caractéristiques fondamentales d'une série hydrologique des débits doivent être considérées (Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997). Selon ces auteurs, les caractéristiques fondamentales sont la magnitude, la fréquence, la durée, la période d'occurrence et la variabilité. Chacune de ces caractéristiques joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement et l'évolution des hydrosystèmes fluviaux. Depuis le siècle dernier, le continent nord-américain a connu de grandes périodes de sécheresse qui sont bien documentées. Cependant, l'intensité de ces sécheresses varie d'une région à une autre. Dans les bassins versants des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent, très peu d'études existent encore sur la répartition spatio-temporelle de la sécheresse et aucune étude n'a analysé les caractéristiques de la sécheresse hydrologique de l'hydrosystème du fleuve Saint-Laurent ni déterminé les facteurs qui les influencent.

### 1.4 Objectifs et hypothèses

La présente étude vise à combler ces lacunes. Notre démarche a été organisée autour de trois objectifs. L'objectif premier est de caractériser le phénomène de sécheresse hydrologique qui affecte les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent et du lac Ontario. Cette quantification consistera à définir les caractéristiques de sécheresse hydrologique soit la magnitude, la durée, la fréquence, la période d'occurrence et la variabilité de cette sécheresse. L'hypothèse qui sous-tend cet objectif est la suivante :

les caractéristiques de cette sécheresse s'inscrivent dans le cadre des grandes périodes de sécheresse connues en Amérique du Nord. Par conséquent, elles sont similaires pour les deux plans d'eau. Le second objectif est de comparer la variabilité interannuelle de ces caractéristiques selon ces deux écosystèmes aquatiques. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les caractéristiques de sécheresse du fleuve Saint-Laurent et du lac Ontario sont comparables en raison du fait que le premier système aquatique est le principal exutoire naturel du second. Ainsi, les impacts induits par cette sécheresse sur la stationnarité de ces deux plans d'eau devraient être similaires et synchrones. Enfin, le troisième objectif vise à déterminer quels facteurs climatiques influencent les caractéristiques de la sécheresse de ces deux plans. L'hypothèse retenue est que la sécheresse qui affecte les deux plans d'eau est influencée par les mêmes indices climatiques.

## **1.5 Méthodologie**

### **1.5.1 Description du site à l'étude**

Le fleuve Saint-Laurent est le principal exutoire naturel du lac Ontario. Il est un des plus grands fleuves du monde. Il mesure 3060 km et couvre une superficie de 1 300 000 km<sup>2</sup>. Près de la moitié du bassin versant est située dans la province du Québec (Canada) où il reçoit les plus grands affluents dont les principaux sont la rivière des Outaouais (179 000 km<sup>2</sup>) en rive nord et la rivière Richelieu (22 000 km<sup>2</sup>) en rive sud.

### **1.5.2 Analyses statistiques des séries hydrologiques**

Les caractéristiques de sécheresse hydrologique (magnitude, fréquence, durée, période d'occurrence et variabilité) présentées dans le tableau 1.3 ont été déterminées d'après la méthode de seuillage par Yevjevich (1967) dont le choix des valeurs seuils est défini par des valeurs de percentiles et correspondent à des niveaux d'intensité de la sécheresse hydrologique. Le test de Lombard a été utilisé pour analyser les impacts de la sécheresse sur la tendance à long terme et la stationnarité (moyenne et variance) des

séries des niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Enfin, l'analyse de la relation entre les indices climatiques et les niveaux d'eau moyens annuels a été effectuée au moyen de la méthode d'analyse de corrélation dans le but d'identifier les indices climatiques qui influencent la sévérité de la sécheresse.

**Tableau 1.3**

Détermination des degrés de sévérité de sécheresse en fonction  
des valeurs de percentiles  $P_i$

<b><math>P_i</math></b>	<b>Signification</b>	<b>Caractérisation du degré de sécheresse</b>
<b>50</b>	Percentile 50 (la moitié des données des niveaux d'eau sont supérieures à la valeur du niveau d'eau correspondant à ce percentile)	Degré de sécheresse faible (Degré 1)
<b>40</b>	Percentile 40 (60 % des données des niveaux d'eau sont supérieures à la valeur du niveau d'eau correspondant à ce percentile)	Degré de sécheresse modérée (Degré 2)
<b>30</b>	Percentile 30 (70 % des données des niveaux d'eau sont supérieures à la valeur du niveau d'eau correspondant à ce percentile)	Degré de sécheresse très forte (Degré 3)
<b>20</b>	Percentile 20 (80 % des données des niveaux d'eau sont supérieures à la valeur du niveau d'eau correspondant à ce percentile)	Degré de sécheresse très forte (Degré 4)
<b>10</b>	Percentile 10 (90 % des données des niveaux d'eau sont supérieures à la valeur du niveau d'eau correspondant à ce percentile)	Degré de sécheresse extrême (Degré 5)

### **1.5.3 Analyse de la relation entre les indices climatiques et les niveaux d'eau moyens annuels**

Les données des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent ont été extraites du site web d'Environnement Canada. Ces données sont mesurées à la station de Sorel située en aval de la confluence entre le fleuve Saint-Laurent et son principal affluent, la rivière des Outaouais depuis 1912. Quant aux données des niveaux d'eau du lac Ontario, elles

proviennent également du site d'Environnement Canada. La justification de ce choix de station repose sur le fait que les principaux apports d'eau du fleuve Saint-Laurent proviennent du lac Ontario et que les données mesurées depuis 1918 sont complètes. Pour les deux écosystèmes aquatiques, les niveaux d'eau moyens annuels ont été déduits des moyennes des niveaux d'eau mensuels de 12 mois. Pour comparer la sévérité de la sécheresse entre les deux écosystèmes aquatiques, on a analysé les données mesurées entre 1918 et 2010.

En ce qui concerne les indices climatiques, on a retenu cinq indices dont l'influence sur la variabilité spatio-temporelle des variables hydroclimatiques en Amérique du Nord a été déjà démontrée (Assani *et al.*, 2008; Anctil et Coulibaly, 2004; Curtis, 2008; Déry et Wood, 2005; Enfield *et al.*, 2001; Kingston *et al.*, 2006; McCabe *et al.*, 2004; Sutton et Hodson, 2005). Il s'agit des indices climatiques suivants : l'Oscillation arctique (OA), l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA), l'Oscillation Atlantique multi-décennale (OAM), l'Oscillation Pacifique décennale (OPD) et l'Oscillation australe (OAU). Les données de ces oscillations ont été extraites du site web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Les définitions de ces cinq indices sont consignées dans le tableau 1.4.

**Tableau 1.4**  
Indices climatiques analysés

<b>Indice climatique</b>	<b>Localisation du phénomène</b>	<b>Mode de calcul de l'indice</b>
Oscillation Atlantique multi-décennale (OAM)	Océan Atlantique Nord	Variabilité interannuelle des indices de température de surface de l'océan Atlantique Nord
Oscillation arctique (OA)	Hémisphère nord extratropicale	Différence des pressions d'une année à l'autre entre le pôle nord et le parallèle de 45°Nord
Oscillation Nord-Atlantique (ONA)	Zone nord-atlantique extratropicale	Différence des pressions entre le Sud (Péninsule Ibérique) et le nord (Islande) du bassin nord atlantique
Oscillation Pacifique décennale (OPD)	Océan Pacifique Nord (au 20°N)	Variation interannuelle des indices de température de surface de l'océan Atlantique Nord
Oscillation australe (OAU)	Océan austral tropical	Variation mensuelle de la différence de pressions entre le pacifique austral occidental Darwin (Australie), et le pacifique austral central (Tahiti)

## 1.6 Résultats

Les résultats obtenus ont permis d'analyser les aspects de la sécheresse hydrologiques des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. Cinq caractéristiques de la sécheresse hydrologique ont été définies, plus précisément l'intensité (sévérité), la durée, la période d'occurrence, la fréquence et la variabilité de la sécheresse hydrologique. Aucune différence significative n'a été observée entre le lac Ontario et le

fleuve Saint-Laurent en ce qui concerne la magnitude, la durée, la fréquence et la variabilité de la sécheresse hydrologique, quelle que soit la valeur seuil sélectionnée. Par contre, l'analyse des périodes d'occurrences des années de sécheresse a montré que les sécheresses dans le Lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent n'ont pas été synchrones. À l'échelle décennale, les observations démontrent que les années 1930 furent particulièrement sèches pour le lac Ontario. En contrepartie, la décennie 1960 et la décennie 2000 se sont avérées des années où la sécheresse hydrologique a sévi pour le fleuve Saint-Laurent. L'analyse des impacts des séquences de sécheresse sur la stationnarité (moyenne et variance) a indiqué deux ruptures de la moyenne à long terme des niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario.

**Tableau 1.5**

Comparaison des impacts sur la stationnarité de la sécheresse hydrologique IS ( $IS < 0$ ) pour les niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent (1918-2010)

<b>Impacts sur la stationnarité</b>	<b>Lac Ontario</b>	<b>Fleuve Saint-Laurent</b>
Moyenne	1930 (-) 1943 (+)	-
Variance	1965-1966	-

Un premier changement de la moyenne de nature abrupte s'est produit en 1942-1943 et un second a été détecté pour la période 1930-1931. La même analyse a révélé des changements significatifs dans la variance des niveaux d'eau du lac Ontario en 1965-1966. Quant au fleuve Saint-Laurent, nos analyses n'ont pas démontré de changement significatif de la moyenne et de la variance. Enfin, les indices climatiques ont été mis en corrélation avec les niveaux d'eau moyens annuels pour obtenir des informations sur l'influence des facteurs climatique sur les caractéristiques de la sécheresse hydrologique. Malgré les différences dans la stationnarité du lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent, les données d'indices de sécheresse hydrologique des deux plans d'eau sont corrélées aux mêmes indices climatiques.

**Tableau 1.6**

Comparaison des relations entre les indices de sécheresse ( $IS < 0$ ) pour les niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent (1918-2010) et les indices climatiques

Degré de sécheresse	Lac Ontario	Fleuve Saint-Laurent
Faible à forte (P50, P40, P30)	OPD (-)	OPD (+)
Très forte à extrême (P20, P10)	ONA (-)	ONA (+)

Néanmoins, la corrélation dépend de l'intensité de la sécheresse. Pour les sécheresses faibles à forte, OPD est le seul indice relié à la sécheresse, tant que pour les sécheresses très fortes à extrêmes, elles sont exclusivement corrélées à l'oscillation Nord-Atlantique.



## **CHAPITRE II**

### **COMPARAISON OF LAKE ONTARIO AND ST. LAWRENCE RIVER HYDROLOGIC DROUGHT AND THEIR RELATIONSHIP TO CLIMATE INDICES**

Stacey Biron, Ali A. Assani, Jean-Jacques Frenette et Philippe Massicotte

(Publié dans la revue *Water Resources Research*, 2014)

**Comparison of Lake Ontario and St. Lawrence River Hydrologic Droughts and  
their Relationship to Climate Indices**

Stacey **Biron\***, Ali A. **Assani\***, Jean-Jacques **Frenette\***, Philippe **Massicotte\***

\* Department of Environmental Sciences and the Research Centre for Watershed-Aquatic Ecosystem Interactions (RIVE-UQTR), University of Quebec at Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec (Canada)

Corresponding Author

\* Corresponding author. Tel.: +1 819-376-5011; Fax: +1 819-376-5179; E-mail: Ali.Assani@uqtr.ca

## Abstract

Five characteristics (intensity or magnitude, duration, frequency, timing and variability) of drought, defined using the threshold level method (TLM) and recorded in mean annual water levels in Lake Ontario and the St. Lawrence River from 1918 to 2010, were compared. Timing is the only characteristic that is different for the two water bodies. For Lake Ontario, the most intense drought occurred in the 1930's, whereas in the St. Lawrence River, intense droughts took place in the 1960's and 2000's. The Lake Ontario drought produced two shifts in mean before (decrease) and after (increase) the 1930's. The change in variance that took place in the 1960's is thought to be related to the construction of locks during the digging of the seaway. The droughts that affected the St. Lawrence River had no impact on the stationarity (mean and variance) of the annual mean water level series. Analysis of the correlation between drought severity and climate indices revealed that years characterized by very weak to moderate drought are significantly correlated with PDO (Pacific Decadal Oscillation), while those characterized by intense drought are correlated with NAO (North Atlantic Oscillation). Both climate indices are negatively correlated with Lake Ontario water levels, while they are positively correlated with St. Lawrence River levels. The study suggests that NAO may be used to predict the driest years for the two water bodies.

Keywords: water level, variability, statistical analysis, climate index, St. Lawrence River, Lake Ontario.

## Introduction

Although many studies have looked at hydrological drought in all climatic regions of the World (e.g., Goodrich, 2007; Heim, 2002; Mishra and Sing, 2010, 2011; Vicente-Serrano *et al.*, 2012), none used all drought characteristics to quantify the environmental impacts of this extreme hydrological phenomenon. From an ecological standpoint, the introduction of the “natural flow” paradigm (flow unaffected by human activity) showed that all the fundamental characteristics of flow must be considered to

restore and maintain the ecological integrity of fluvial ecosystems (Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997). According to these authors, the five characteristics that define surface water stream flow are: magnitude, duration, timing, frequency and variability, each of which plays a role in the function of fluvial ecosystems.

We demonstrate for the first time that hydrological drought, as an extreme flow phenomenon, may be defined by these five fundamental characteristics. We also show that this paradigm can be used to characterize water levels in both lentic and lotic systems. As an example, this paradigm is used to analyze the temporal variability of hydrological drought in both a lentic (Lake Ontario) and a lotic (St. Lawrence River) system, the latter being the former's main natural outflow. Thus, the aim of the study is based on three fundamental hypotheses:

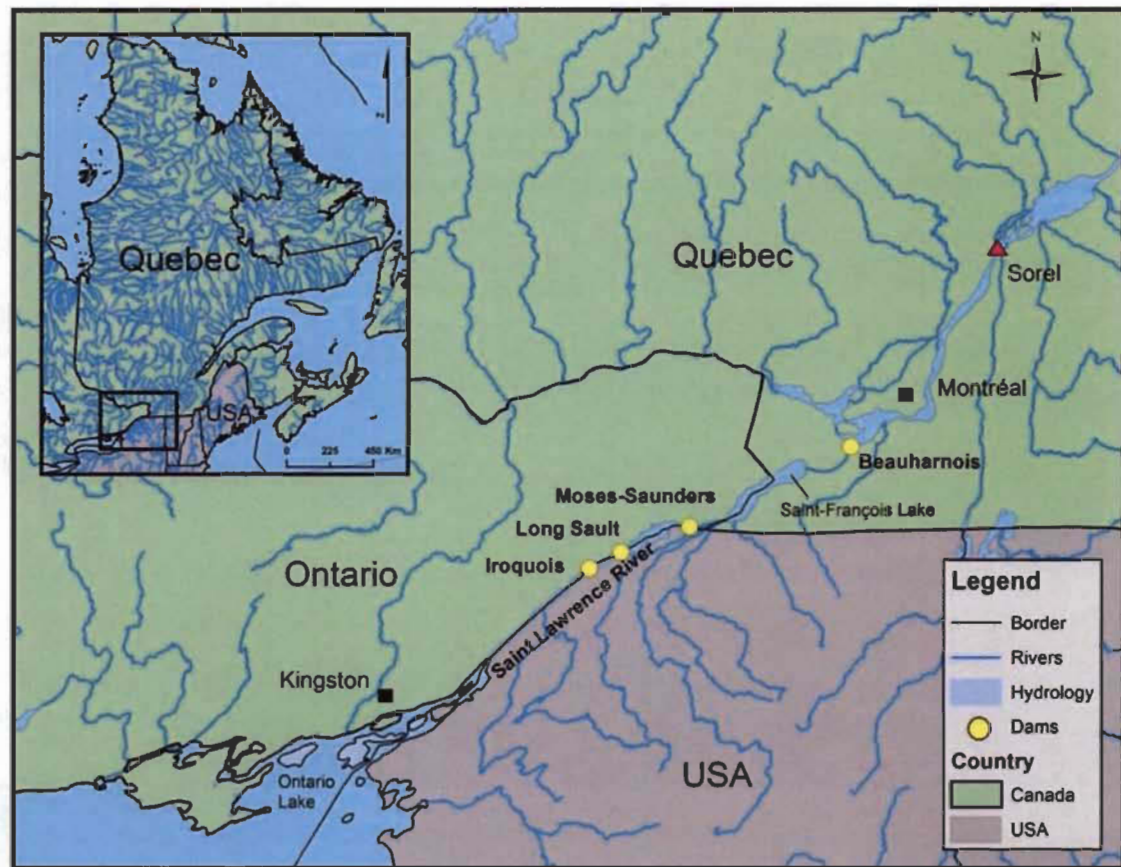
1. The temporal variability of hydrological drought characteristics (magnitude, duration, timing, frequency and variability) is similar for both water bodies;
2. The impacts of these characteristics on the stationarity (mean and variance) of annual mean water levels in these two water bodies are also similar;
3. The temporal variability of hydrological drought for these two water bodies is affected by the same climate indices.

The novel nature of the study rests in the fact that, although a growing number of studies are looking at this critical issue in the current climate warming context, this is the first to analyze the five characteristics (components) of hydrological drought defined according to the “natural flow” ecological paradigm. According this paradigm, the five components (magnitude, frequency, duration, timing and variability or rate of change) of the flow regime influence both directly and indirectly ecological integrity (Richter *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 1997).

## Methodology

### *Description of study sites*

The St. Lawrence River is sourced in Lake Ontario and flows into the Atlantic Ocean. It drains a 1 600 000 km<sup>2</sup> watershed in which land use is dominated by a high degree of urbanization near Montreal and areas of agriculture, pastures, forests and wetlands in the mid and lower reaches of the river system (e.g., Frenette *et al.*, 2006; Vis *et al.*, 2007). The largest tributaries are the Ottawa River (179 000 km<sup>2</sup>) on its north shore and the Richelieu River (22 000 km<sup>2</sup>) on its south shore. To ease trade between the Great Lakes region and other continents, the construction of a long canal system along the length of the St. Lawrence River bed and the Great Lakes started in 1954. This system, known as the Great Lakes-St. Lawrence Seaway System, is a 3700 km long waterway linking the Atlantic Ocean with the Great Lakes. It contains 19 locks and numerous dams which regulate water levels in Lake Ontario and the St. Lawrence River. All the dams are found between the cities of Cornwall and Montreal, the main dams being the Moses-Saunders, Long Sault, Iroquois, and Beauharnois (Figure 2.1). Aside from these dams, the main tributary of the St. Lawrence, the Ottawa River, is highly regulated by many reservoirs. This flow regulation results in the occurrence of maximum flows in winter and minimum flows during the spring, which produces an inversion of the natural hydrologic cycle of streamflow downstream from the dams (e.g. Assani *et al.*, 2005, 2006; Lajoie *et al.*, 2007; Matteau *et al.*, 2009). The effects of this inversion may be observed as far downstream as the confluence of the St. Lawrence River with its tributaries (Vadnais *et al.*, 2012).



**Figure 2.1** Location of the study area.

### *Data sources*

Water level data for the St. Lawrence River were taken from the Environment Canada website <http://www.wsc.ec.gc.ca/applications/H2O/index-eng.cfm> (March 20th, 2011). Water levels are measured daily at the Sorel station, which is located immediately upstream from Lac Saint-Pierre (Figure 2.1). This station was chosen for two reasons: (1) the series of water level data measured since 1912 is nearly complete; and (2) this is the reference station for studies of water levels in the St. Lawrence in Quebec (Hudon, 2004). As for water level data for Lake Ontario, they were also taken from the Environment Canada website (<http://www.ec.gc.ca/eau-water/>), which are measured by the Detroit District branch of the US Army Corps of Engineers. Water level measurements are recorded from Lake Ontario since 1918. We analyzed the annual mean water level series generated from monthly mean water levels from January to

December for the period between 1918 and 2010. Use of the paired t-test revealed that these mean values are not significantly different than those that would be produced using monthly data from October (start of the hydrological year in Quebec) to September (end of the hydrological year in Quebec).

Climate index series were produced using the same approach as water level series. The five climate indices which are known to affect the temporal variability of hydroclimatic variables (temperature, precipitation, streamflow, and water levels) in Quebec and North America (e.g., Assani *et al.*, 2008, 2010, 2011; Anctil and Coulibaly, 2004; Coulibaly and Burn, 2004, 2005; Curtis, 2008; Déry and Wood, 2004, 2005; Enfield *et al.*, 2001; Kingston *et al.*, 2006; McCabe *et al.*, 2004; Sutton and Hodson, 2005) were selected. These indices are AMO (Atlantic Multi-decadal Oscillation), AO (Arctic Oscillation), NAO (North Atlantic Oscillation), PDO (Pacific Decadal Oscillation), and SOI (Southern Oscillation Index). The five climate indices are summarized in Table 2.1.

**Table 2.1**  
The Five Climatic Indexes Used

Index	Location of Phenomenon	Index definition
AMO (Atlantic Multi-Decadal Oscillation)	North Atlantic Ocean	Mean SST north in the Atlantic north of the Equator, between 0°N– 60°N and 75°W–7.5°W
AO (Arctic Oscillation)	Extratropical Northern Hemisphere	Difference in SLP between the North Pole and the 45°N
NAO (North Atlantic Oscillation)	Extratropical North Atlantic Zone	Difference in SLP between the north (Reykjavik, Iceland) and the south (Ponta Delgada, Spain) of the North Atlantic Basin
PDO (Pacific Decadal Oscillation)	North Pacific Ocean poleward of 20°N	The leading PC of monthly SST anomalies in the North Pacific Ocean, poleward of 20°N
SOI (Southern Oscillation)	Tropical South Pacific	Difference in SLP between the South West Pacific (Darwin) and the Central South Pacific (Tahiti)

### *Statistical analysis of hydrologic series*

#### Definition of the characteristics of hydrological drought

A hydrological drought occurs when streamflow or water levels measured during a given year (or season or month or day) are below a given threshold level. This definition has led to the development of the so-called “threshold level method (TLM)” widely used in countries with temperate climate (Yevjevich, 1967). According to van Huijgevoort *et al.* (2012), this method presents two advantages over other approaches used to define droughts: (1) it does not require *a priori* knowledge of the probability distribution of analyzed hydrological series; (2) it directly produces drought characteristics (e.g. severity, frequency, duration), if the threshold is set by drought-impacted sectors.



However, the choice of the threshold value used to define a drought is not fixed. According to van Huijgevoort *et al.* (2012), this threshold can either be defined from its observation percentile statistics, generally taken as the 20th percentile of the hydrological series analyzed or by fitting some kind of statistical function through the data (normal, gamma, Gumbel, GEV, etc.) from which probabilities can be estimated, e.g. the 20 % of cumulative probability function. The advantage of applying the latter approach is that it leads to more robust statistics especially where in case only a limited time series is available. However, its disadvantage lies in the fact that, for extreme situations (both during extreme dry and wet conditions), this distribution does not fit the entire range of observations. In addition, for some hydrological series, complex statistical distributions must sometimes be used which can be difficult to implement.

In light of the above, the first approach based on calculating percentiles directly from the cumulative curve for observational data was selected for this study and the following equation was used:

$$DI = (N_i - P_\alpha)/S < 0 \quad (1)$$

where DI is the drought severity index for year  $i$ ;  $N_i$  is the annual mean water level during year  $i$ , and  $P_\alpha$  is the annual mean water level corresponding to a given percentile obtained from the cumulative curve for annual mean water levels measured from 1918 to 2010,  $S$  being the standard deviation calculated for the annual mean water level series. The threshold value,  $P_\alpha$ , can thus be used to characterize different drought severity levels.

**Table 2.2**  
Definition of Drought Severity Levels as a Function of  $P_{\alpha}$  Percentile Values

Threshold Level ( $P_{\alpha}$ )	Definition	Drought Level Characterization
P50	50 <sup>th</sup> percentile (less half of mean annual water level data are lower than the water level value corresponding to this percentile)	Very low drought level (Level 1)
P40	40 <sup>th</sup> percentile (less 40% of mean annual water level data are lower than the water level value corresponding to this percentile)	Low drought level (Level 2)
P30	30 <sup>th</sup> percentile (less 30% of mean annual water level data are greater than the water level value corresponding to this percentile)	Moderate drought level (Level 3)
P20	20 <sup>th</sup> percentile (less 20% of mean annual water level data are greater than the water level value corresponding to this percentile)	High drought level (Level 4)
P10	10 <sup>th</sup> percentile (less 10% of mean annual water level data are greater than the water level value corresponding to this percentile)	Very high drought level (Level 5)

Five values of  $P_{\alpha}$  were selected to define these different levels. These values are explained in Table 2.2. According to Equation 1, all negative values of DJ correspond to dry years. Thus, the five characteristics of drought for water levels in Lake Ontario and the St. Lawrence River were defined using Equation 1, as follows:

- Drought intensity or magnitude was defined using the DJ value. For a given  $P_{\alpha}$ , higher negative values of DJ reflect more intense or severe drought. The level of severity or intensity of a drought was defined using the  $P_{\alpha}$  threshold value, smaller values of  $P_{\alpha}$  resulting in more intense drought. A comparison of drought

severity for the two water bodies over the period from 1918 to 2010 was performed using the Chi-square method.

- Drought duration was calculated by counting the number of years for which  $DI < 0$  for a given  $P_\alpha$ . Comparison of drought duration was also performed using the Chi-square test. Four statistical distributions (geometric, Pólya, negative binomial and Erickson model) were also fitted to describe the sequences of drought duration, but results were not conclusive since none of the four distributions could be fitted to drought duration sequences for the two water bodies.
- Drought timing was defined as the year during which a value of  $DI < 0$  for a given  $P_\alpha$  threshold. The timing (in years) of droughts was compared for the two water bodies.
- Drought frequency was defined as the total number of years for which  $DI < 0$  for a given  $P_\alpha$  threshold during the period from 1918 to 2010. A comparison of drought frequency for the two water bodies was performed using the Chi-square test.
- Drought variability was defined using the coefficient of variation (CV, ratio of the mean and its standard deviation). Coefficient of variation values were calculated exclusively from years for which  $DI < 0$ . A comparison of CV values for the two water bodies was also performed using the Chi-square test.

#### Comparison of the impacts of drought on the stationarity of hydrological series

To constrain the impacts of drought on the long term mean and variance of water levels in Lake Ontario and the St. Lawrence River, we used the Lombard method (see Lombard, 1987; Quessy *et al.*, 2011), which constrains the type (abrupt or smooth) and timing (years) of changes affecting mean and variance values of analyzed hydrological series. Suppose a series of observations, noted  $X_1, \dots, X_n$ , where  $X_i$  is the observation taken at time  $T = i$ . These observations are supposed to be independent. One question of

interest is to see whether the mean of this series has changed. If  $\mu_i$  refers to the theoretical mean of  $X_i$ , then a possible pattern for the mean is given by Lombard's smooth-change model where

$$\mu_i = \begin{cases} \theta_1 & \text{if } 1 \leq i \leq T_1 \\ \theta_1 + \frac{(i - T_1)(\theta_2 - \theta_1)}{T_2 - T_1} & \text{if } T_1 < i \leq T_2 \\ \theta_2 & \text{if } T_2 < i \leq n \end{cases} \quad (2)$$

In other words, the mean changes gradually from  $\theta_1$  to  $\theta_2$  between times  $T_1$  and  $T_2$ . As a special case, one has the usual abrupt-change model when  $T_2 = T_1 + 1$ . In order to test formally whether the mean in a series is stable or rather follows model (2), one can use the statistical procedure introduced by Lombard (1987). To this end, define  $R_i$  as the rank of  $X_i$  among  $X_1, \dots, X_n$ . Introduce the Wilcoxon score function  $\phi(u) = 2u - 1$  and define the rank score of  $X_i$  by

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_\phi} \left\{ \phi \left( \frac{R_i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}, \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

where

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi \left( \frac{i}{n+1} \right) \quad \text{and} \quad \sigma_\phi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \phi \frac{i}{n+1} - \bar{\phi} \right\}^2 \quad (4)$$

Lombard's test statistic is

$$S_n = \frac{1}{n^5} \sum_{T_1=1}^{n-1} \sum_{T_2=T_1+1}^n L_{T_1 T_2}^2 \quad (5)$$

where

$$L_{T_1 T_2} = \sum_{j=T_1+1}^{T_2} \sum_{i=1}^j Z_i \quad (6)$$

One concludes that the mean of the series changes significantly according to a pattern of type (2) whenever  $S_n > 0.0403$ . This value corresponds to the theoretical (critical) values (see Lombard, 1987) defining the significance level at 5% for the test. Note that the equation proposed by Lombard (1987) to detect multiple abrupt changes in the mean of a statistical series was also applied. This formula confirmed results obtained using equation 2. It is also possible to test whether the variance of the series changes by using the so-called Mood score function, namely  $\phi(u) = (2u - 1)^2$ . It is important to note that the assumptions regarding Lombard method (Quessy *et al.*, 2011) are valid for this application. Among these hypotheses, we checked for autocorrelation between values in analyzed hydrological series. Statistically significant autocorrelation was removed by using the pre-whitening procedure (Von-Storch and Navarra, 1995).

#### Analysis of the relationship between climate indices and annual mean water levels

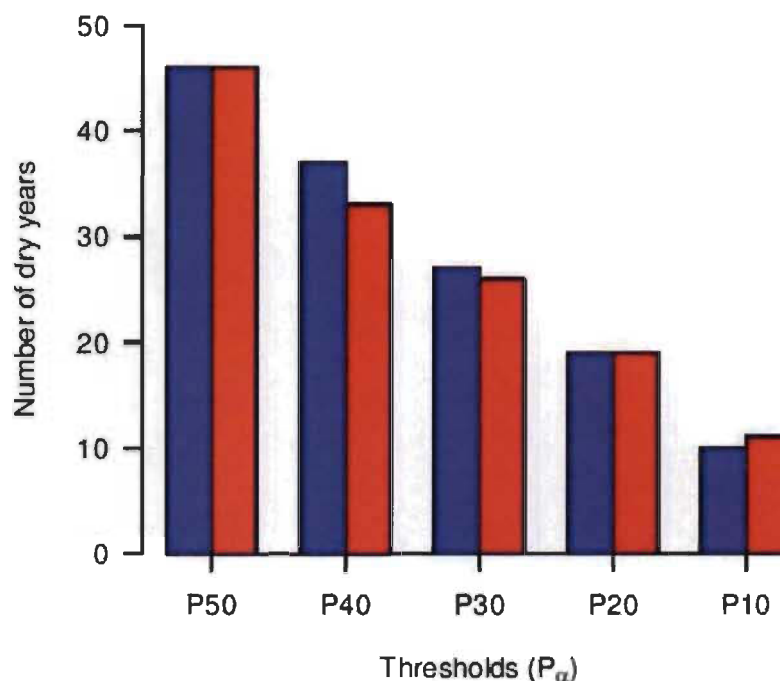
To constrain which climate indices are likely to account for the temporal variability of drought severity (intensity) levels, we carried out a two-step correlation analysis which consisted first in correlating the negative values of DI ( $DI < 0$ ) obtained for the various threshold values with the five selected climate indices, and then correlating these climate indices with all water level series data (standardized values) for the period from 1918 to 2010.

## Results

### *Comparison of the characteristics of hydrological drought for water levels in Lake Ontario and the St. Lawrence River*

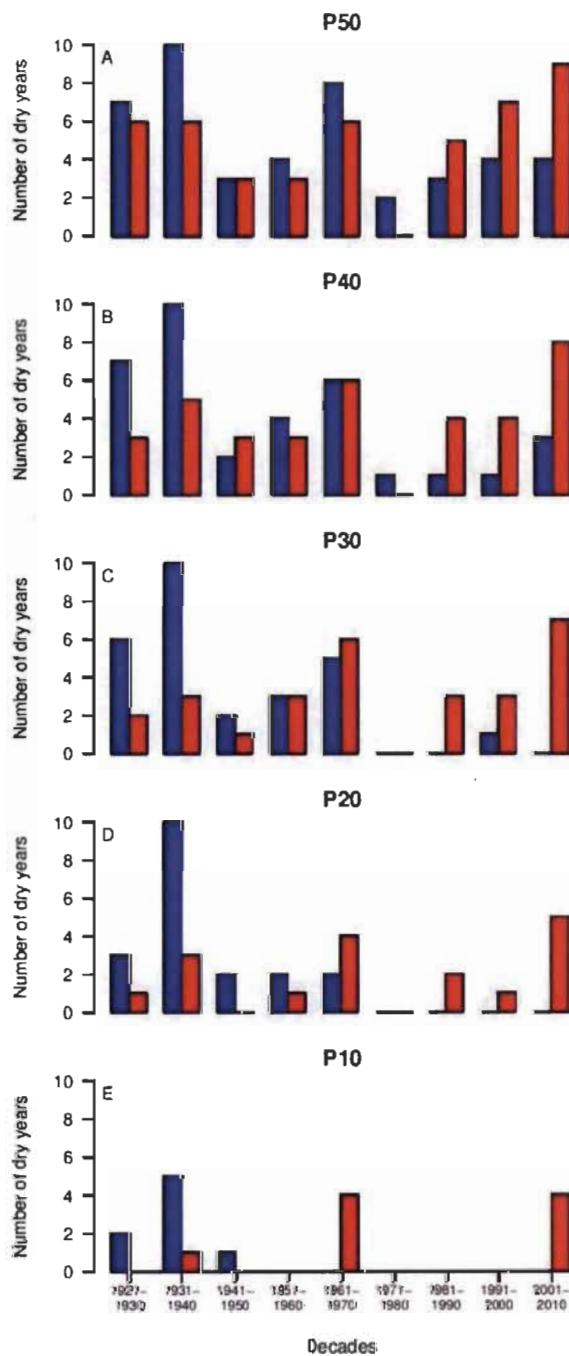
Figure 2.2 compares the total number of dry years (absolute frequency) for the various threshold levels over the period from 1918 to 2010 for two water bodies. Use of the Chi-square method revealed that there is no statistically significant difference in the frequency of drought years between the St. Lawrence River and Lake Ontario,

regardless of the threshold percentile ( $P_a$ ) used. It follows that drought severity or intensity is the same for the two water bodies.

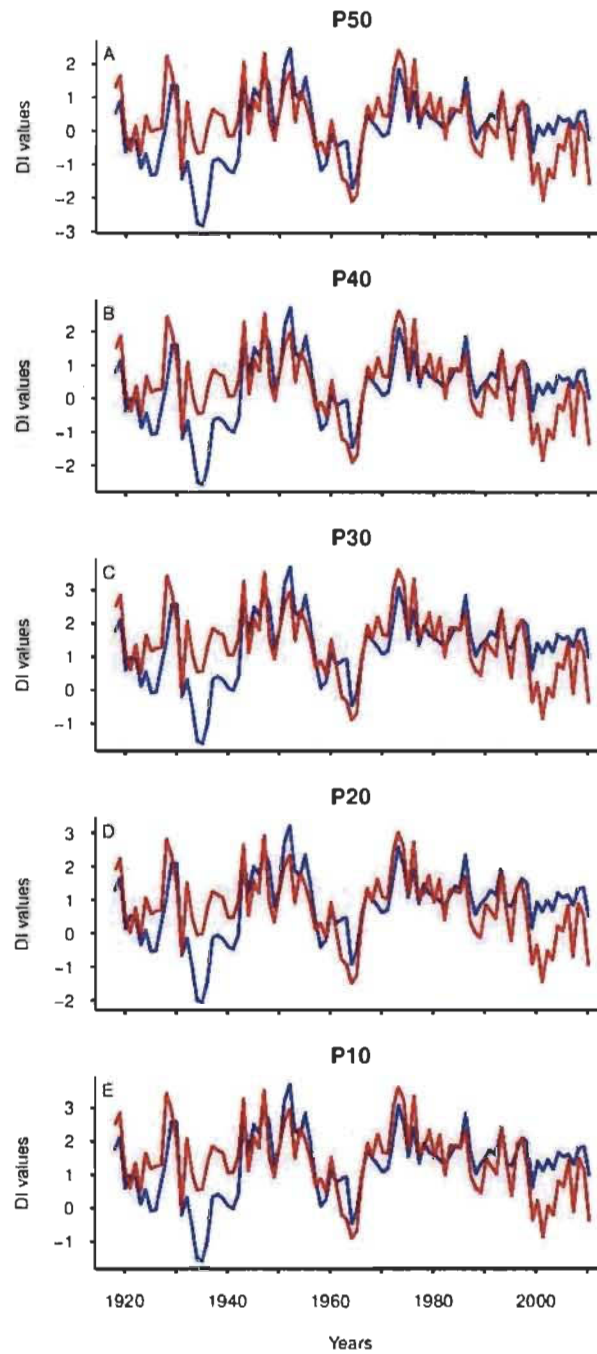


**Figure 2.2** Comparison of the total number of dry years ( $DI < 0$ ) for different threshold levels between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010.

However, the analysis of the timing of dry years reveals that droughts in the two water bodies were not synchronous. At the decadal scale (Figure 2.3), the 1930's were particularly dry for Lake Ontario, while the 1960's and 2000's were dry decades for the St. Lawrence River. At least 40% of years during these decades were characterized by more or less intense droughts. This trend is also observed at the annual scale (Figure 2.4). Negative values of  $DI$  are frequent during these decades.

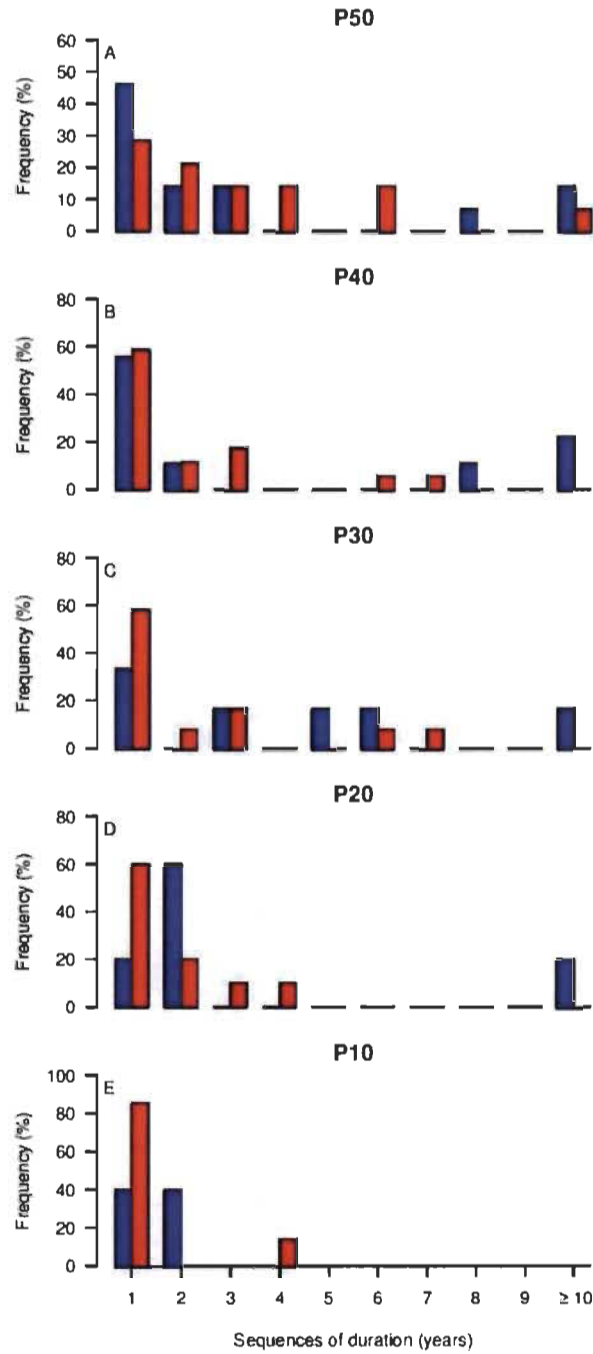


**Figure 2.3** Comparison of the total number of dry years (DI < 0) per decade between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010. A = P50; B = P40; C = P30; D = P20; E = P10.



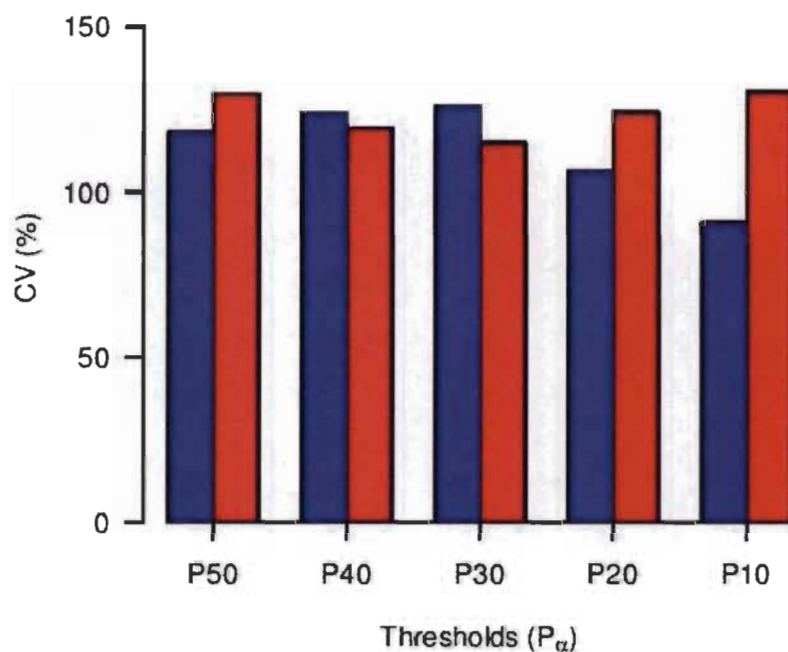
**Figure 2.4** Comparison of the temporal variability of DI values between Lake Ontario (blue curves) and the St. Lawrence River (red curves) for the period from 1918 to 2010. A = P50; B = P40; C = P30; D = P20; E = P10.





**Figure 2.5** Comparison of the duration of sequences of consecutive dry years (DI < 0) between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010. A = P50; B = P40; C = P30; D = P20; E = P10.

The mean duration of sequences of dry years decreases with decreasing  $P_\alpha$  (Figure 2.5). For high threshold values, it is on the order of three years, whereas for lower thresholds, it is on the order of one year. Thus, the likelihood of a dry year when the previous year is also dry is lower for lower threshold values. It follows that extreme droughts do not last long, although some droughts may last for more than 10 consecutive years (Figure 2.5), as is the case for Lake Ontario during the 1930's. Finally, as far as the variability of drought intensity is concerned, comparison of CV values (Figure 2.6) using the Chi-square method did not bring out any significant difference between the two water bodies for any of the five drought thresholds.



**Figure 2.6** Comparison of CV values for dry years ( $DI < 0$ ) between Lake Ontario (blue bars) and the St. Lawrence River (red bars) for the period from 1918 to 2010.

***Impacts of drought on the stationarity of annual mean water level series for Lake Ontario and the St. Lawrence River***

Results from the Lombard analysis are shown in Tables 2.3 (mean) and 2.4 (variance). For Lake Ontario, the shift in mean was abrupt and took place in 1942-1943 (Whole Period). Analysis of the series after 1943 indicated (Sub-Period II) no other shift in mean. However, analysis of water levels prior to 1942 (Sub-Period I) showed a second abrupt shift in mean which took place in 1930-1931. Thus, the temporal variability of water levels in Lake Ontario was characterized by two shifts in mean. The first shift took place in 1930-1931 and displayed a significant decrease in water levels, while the second shift took place in 1942-1943 and exhibited a significant increase in the mean annual of water levels (Figure 2.7). In contrast, no significant change in mean is observed for the St. Lawrence River (Table 2.3).

**Table 2.3**

Analysis of the Stationarity (mean) of Water Level Series for the St. Lawrence River and Lake Ontario (1918-2010)<sup>a</sup>

	Whole Period (1918-2010)			Subperiod I (1918-1941)			Subperiod II (1944-2010)		
	Sn	T1	T2	Sn	T1	T2	Sn	T1	T2
Lake Ontario	0.0765a	1942	1943	0.0587a	1930	1931	0.0098	-	-
St-Lawrence	0.0403	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>a</sup> Results of the Lombard method applied to series means. a = Values of Sn > 0.0403 are statically significant at the 5% level. T1 and T2 are years corresponding to beginning and end, respectively, of a significant change in mean.

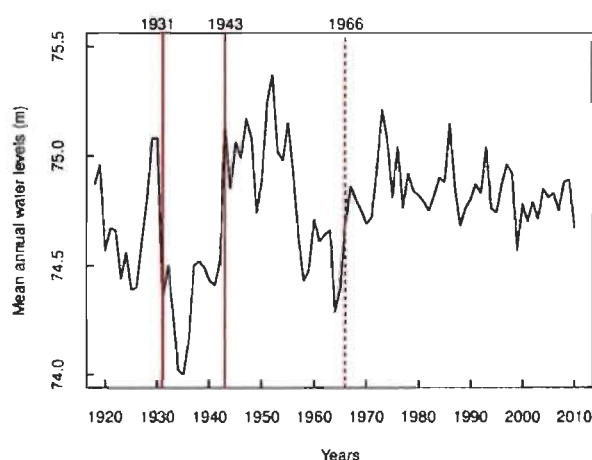
**Table 2.4**

Analysis of the Stationarity (variance) of Water Level Series for the St. Lawrence River and Lake Ontario (1918-2010)<sup>a</sup>

	Whole Period (1918-2010)			Subperiod I (1918-1941)			Subperiod II (1944-2010)		
	Sn	T2	T1	Sn	T1	T2	Sn	T1	T2
Lake Ontario	0.2632a	1965	1966	-	-	-	-	-	-
St-Lawrence	0.089	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>a</sup> Results of the Lombard method applied to series means. a = Values of Sn > 0.0403 are statically significant at the 5% level. T1 and T2 are years corresponding to beginning and end, respectively, of a significant change in mean.

The same analysis revealed significant changes in the variance of water level in Lake Ontario (Table 2.4), which took place in 1965-1966 (Sn = 0.2632). After the shifts, variance values showed a significant decrease over time (see Figure 2.7). Analysis of water level data before and after this shifts revealed no other change however. For the St. Lawrence River, no change in the variance of water levels could be observed (Sn = 0.0089).



**Figure 2.7** Dates of shifts in mean (solid line) and variance (dotted line) of annual mean water levels in Lake Ontario. No shift was found for the St. Lawrence River.

*Analysis of the relationship between climate indices and values of DI*

Coefficient of correlation values calculated between negative DI values for the different thresholds and the five climate indices are shown in Tables 2.5 and 2.6, from which the following observations may be drawn:

For both water bodies, drought, as defined by  $DI < 0$  values, is significantly correlated primarily with PDO and NAO. However, the sign and strength of these correlations vary. Thus, both indices are positively correlated with DI values for water levels in the St. Lawrence River, while they are negatively correlated with DI values for Lake Ontario water levels, and this correlation is stronger for Lake Ontario (all values are significant at the 5% level) than for the St. Lawrence River.

For both two water bodies, correlation with PDO and NAO indices depends on drought intensity. For low to moderate drought severity levels (P50, P40 and P30), DI values are only correlated with the PDO index, while for high to very high severity levels (P20 and P10), DI values are strongly correlated with NAO (Figure 2.8). A comparison of the temporal variability of water levels in Lake Ontario and the St. Lawrence River and the four climate indices (AMO, NAO, PDO and SOI) to which they are significantly correlated is presented in Figure 2.9.

**Table 2.5**

Coefficients of Correlation Between Climate Indices and DI Values ( $DI < 0$ ) for Water Levels in Lake Ontario (1918-2010)<sup>a</sup>

Threshold Level	N	AMO	AO	NAO	PDO	SOI
TS	93	0.110	0.109	- 0.024	- 0.264a	0.042
P50	44	- 0.095	0.191	- 0.131	- 0.477a	0.086
P40	36	- 0.085	- 0.008	- 0.239	- 0.481a	0.234
P30	30	- 0.240	- 0.040	- 0.057	- 0.472a	0.306 b
P20	20	0.105	0.077	- 0.193	- 0.259	-0.084
P10	10	- 0.041	- 0.369	- 0.849a	- 0.183	-0.479

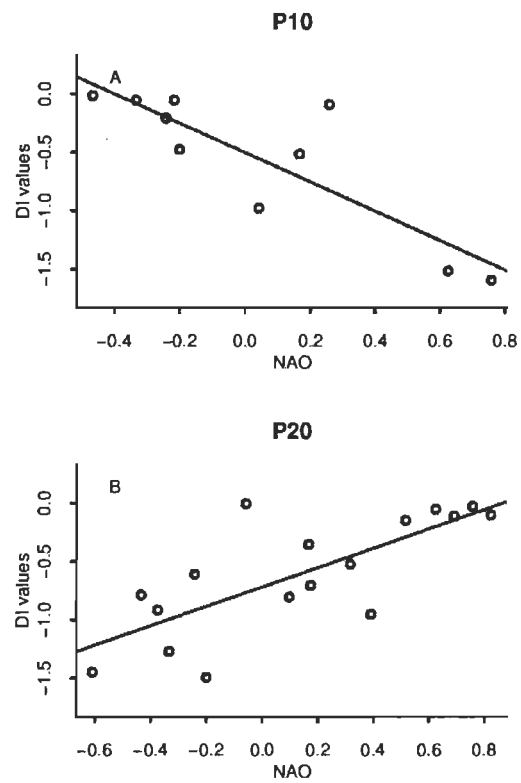
<sup>a</sup> TS = period of study (1918-2010); N = total number of years; a = significant values at the 5% level; b = significant values at the 10% level.

**Table 2.6**

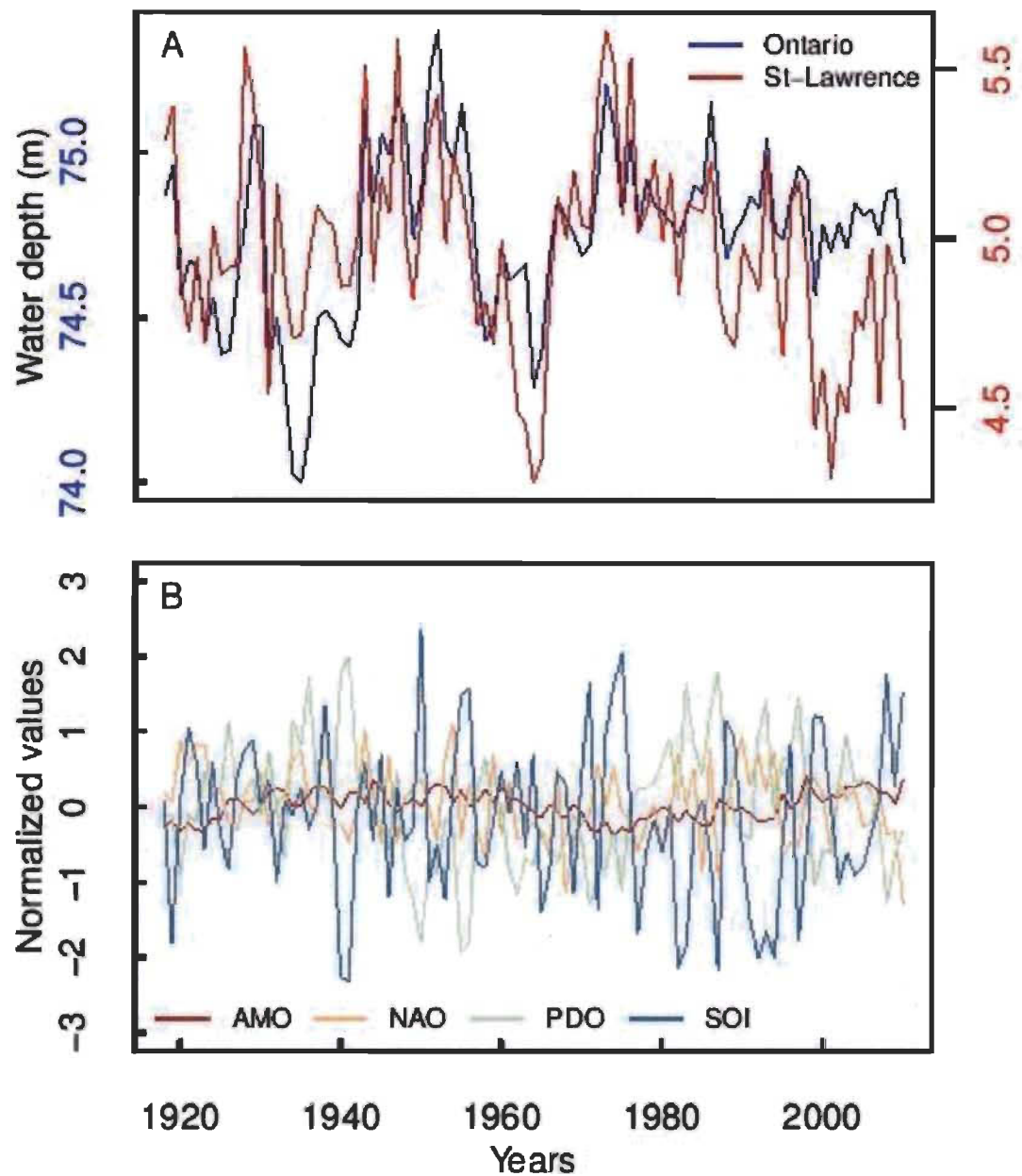
Coefficients of Correlation Between Climate Indices and DI Values ( $DI < 0$ ) for Water Levels in St. Lawrence River (1918-2010)<sup>a</sup>

Threshold Level	N	AMO	AO	NAO	PDO	SOI
TS	93	-0.271a	-0.004	0.069	-0.003	0.079
P50	45	-0.018	-0.004	0.222	0.294a	-0.296a
P40	37	-0.071	-0.068	0.188	0.326b	-0.298 b
P30	28	0.162	-0.084	0.084	0.366 b	-0.249
P20	17	-0.191	0.350	0.754a	0.590a	0.174
P10	11	0.551	0.138	0.516	0.461	-0.096

<sup>a</sup> TS = period of study (1918-2010); N = total number of years; a = significant values at the 5% level; b = significant values at the 10% level.



**Figure 2.8** Relationship between DI values and NAO. A = Lake Ontario (P10); B = St-Lawrence (P20).



**Figure 2.9** Comparison of the temporal variability of water levels (A) in Lake Ontario (blue curve) and the St. Lawrence River (red curve) and the four climate indices (B) (AMO, NAO, PDO and SOI) which are significantly correlated to water levels.



## Discussion and Conclusion

The main goal of this study was to show that the “natural flow” ecological paradigm could be used to analyze the fundamental characteristics of hydrological drought in both lotic (St. Lawrence River) and lentic (Lake Ontario) systems. Using this paradigm, the five characteristics of hydrological drought were defined, namely intensity (severity), duration, timing, frequency and variability (CV).

Comparison of these five characteristics of hydrological drought for annual mean water levels in Lake Ontario and its main natural outflow, the St. Lawrence River, revealed that only the timing of hydrological drought differs for these two water bodies: for Lake Ontario, drought is mainly observed in the 1930's, while for the St. Lawrence River, the 1960's and 2000's were relatively dry decades. In other words, drought episodes in the two water bodies are not synchronous. The 1930's drought which affected North America, known as the Dust Bowl, is well documented in the scientific literature (p. ex., Cook *et al.*, 1999, 2007, 2009, 2011a, 2011b; Goodrich, 2004; Mauget, 2003, 2004; McCabe *et al.*, 2008; Seagar, 2007; Seagar *et al.*, 2009; Schubert *et al.*, 2004). This drought affected over two-thirds of the USA and parts of Canada, though the hardest impacted regions were the central and upper Great Plains (Schubert *et al.*, 2004).

Despite its spatial extent, results derived herein indicate that this drought did not affect the St. Lawrence River. Two factors may account for the absence of a signal for this drought in the temporal variability of mean annual water levels in the St. Lawrence:

- (1) Its intensity was attenuated in the St. Lawrence River watershed. Thus, an analysis of the temporal variability of annual mean flow in St. Lawrence tributaries located south of 47°N (including the Richelieu River, the largest south shore tributary, whose confluence is upstream from the Sorel station) over the period from 1934 to 2000 did not reveal any drought during the 1930's and 1940's in this part of the St. Lawrence River watershed in Quebec. In fact, these two decades were relatively wet decades (Assani *et al.*, 2010).
- (2) Its signal was “scrambled” by the Ottawa River (179 000 km<sup>2</sup>), the largest tributary of the St. Lawrence. The Ottawa River flows down from the subarctic Hudson Bay region, an area spared by the great drought, which primarily affected regions located

south of 45°N in North America. Moreover, numerous dams and reservoirs have been built along the Ottawa River and its major tributaries since the first half of the last century. These works may have played a major role in attenuating the effects of the 1930's drought on streamflow in the Ottawa River and, incidentally, on water levels in the St. Lawrence upstream from the Sorel station.

The drought observed in the St. Lawrence River during the 1960's is also well documented in this region (e.g., Barlow *et al.*, 2001; Bradbury *et al.*, 2002). As the St. Lawrence River watershed is strongly influenced by climate in the northeastern United States, where many of its tributaries including the Richelieu River originate, it is wholly plausible that the drought that affected this region in the 1960's also affected water levels in the St. Lawrence River through its south (right) shore tributaries. In contrast, its signal is strongly attenuated in Lake Ontario. Finally, no signal of the extensive drought of the 1950's is recorded in annual mean water levels in the two water bodies. As for the latest drought period, which affected many regions of North America in the 2000's (e.g. Cook *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2011), it is clearly expressed in the St. Lawrence River watershed, but is missing from the Lake Ontario record. According to McBean and Montee (2008), an increase in precipitation was observed in the North American Great Lakes watersheds during that decade. This would account for the lack of a signal for this drought in annual mean water levels in Lake Ontario. However, it is highly likely that this increase in precipitation would have affected the southern region (United States) drained by the Great Lakes more strongly than the northern region (Canada), because this increase is not observed in the St. Lawrence River watershed in Quebec. According to Brown (2010), the amount of snow during fall and winter decreased significantly in this region, particularly after the 1980's.

Analysis of the impacts of these drought episodes on water level stationarity (mean and variance) revealed that drought resulted in two shifts in the long term mean of annual mean water levels in Lake Ontario. These two shifts took place prior to (1930) and after (1943) the 1930's drought. In contrast, no drought-related impacts are observed on the stationarity (mean and variance) of annual mean water levels in the St. Lawrence River.

It follows that digging of the St. Lawrence Seaway in the 1950's did not significantly affect mean water levels in these two water bodies at the annual scale. However, as far as daily maximum levels are concerned, the impact of the Seaway on the temporal variability of water levels in the St. Lawrence River was observed at the daily scale (Assani *et al.*, 2013).

The change in variance of annual mean water levels in Lake Ontario in 1965-1966 cannot be assigned to any drought period. Since no climatic factor can be called upon, the only plausible explanation is construction related to the digging of the St. Lawrence Seaway (Maritime channel) in the mid-1950's. Many dams and locks were built to regulate the water levels in the St. Lawrence and Lake Ontario. These constructions, however, did not have the same impacts on the temporal variability of water levels in the two water bodies. In Lake Ontario, the decrease in the variance of water levels can be attributed to the regulation of water levels by locks in Lake Ontario.

Despite differences in the stationarity of Lake Ontario and St. Lawrence River water levels, hydrological drought in these two water bodies is correlated with the same climate indices, although this correlation mainly depends on drought severity. For very weak to moderate droughts, PDO is the only index related to drought, while high intensity droughts are exclusively affected by NAO. The sign of the correlation between these indices and water levels in the two water bodies in periods of drought are opposite. Both indices are positively correlated with annual mean water levels in the St. Lawrence River, but negatively correlated with water levels in Lake Ontario. Such a difference in the sign of correlations between climate indices and hydroclimatic variables is observed in many regions of North America (e.g., Curtis, 2008; Enfield *et al.*, 2001; Kingston *et al.*, 2006; McCabe *et al.*, 2004).

In their conceptual model for the relationship between hydroclimatic variables (temperature, precipitation and streamflow) and the AO/NAO indices, Kingston *et al.* (2006) showed that, in northeastern North America, the northeastern United States were characterized by positive correlations with the two indices, while the eastern part of

Canada showed a negative correlation with these indices. Similarly, Curtis (2008) showed that the correlation between AMO and precipitation was positive at most stations along the Atlantic seaboard, but negative for most stations within the continental interior. These opposite signs of correlation may be accounted for by cyclone and anticyclone trajectories, which influence the movement of cool and humid air masses (e.g. Kingston *et al.*, 2006). Many tributaries of the St. Lawrence River drain areas in which climatic conditions are different than in the Great Lakes region, and this may account for the negative and positive correlations with climate indices observed for Lake Ontario and St. Lawrence River respectively.

The nature of climate indices that cause drought in North America is controversial. For some, extensive drought periods are linked to AMO (e.g. Enfield *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2011; McCabe *et al.*, 2004, 2008; Sutton and Hodson, 2005). According to McCabe *et al.* (2008), AMO showed to be the most consistent indicator of drought (decadal and multidecadal times scales) variability in the conterminous US during the 20th century. This conclusion was corroborated by Feng *et al.* (2011) who argued that persistent droughts in the Great Plains and southwest North America are closely related to multidecadal variations of North Atlantic SSTs (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO). This relationship is persistent since at least 1567 AD, as based on proxy SSTs (sea surface temperature) for the North Atlantic and the reconstructed drought index for North America. For others, such drought episodes are due to the La Niña phenomenon (e.g., Cook *et al.*, 1999, 2007, 2009, 2011a, 2011b; Seager, 2007). However, these authors recognize that the effects of this climatic factor would be amplified by human activity and its impacts (massive alterations to land surface, including regional-scale devegetation from crop failures and intensive wind erosion and dust storms) in the case of the great drought of the 1930's. Schubert *et al.* (2004), for their part, suggest that "The Great Plains tend to have above-normal precipitation when the tropical Pacific SSTs are above normal, while there is tendency for drought when the tropical SSTs are cold". In the case of the 1960's drought which affected the northeastern United States, it was associated with NAO as, according to Bradbury *et al.* (2002), this decade was

characterized by “persistent negative NAO conditions” due to “exceptionally cool regional air temperature and SSTs”.

This controversy highlights the fact that drought in North America is related to cooling of surface waters in the Atlantic and/or Pacific oceans. The effect of the interaction of these two oceanic basins on drought in North America was recently recognized by Cook *et al.* (2011a). This cooling affects pressure conditions above the two oceanic watersheds and over the North American continent, thus affecting the circulation of air masses. For this study, cooling of surface waters in the Pacific ocean (correlation with PDO) would lead to weak or moderate drought, while cooling of surface waters in the Atlantic ocean (correlation with NAO) would produce very severe drought. From a climate standpoint, water surface cooling in these two ocean bodies would lead to decreased water vapor transfer from the oceans to the continent due to lower evaporation on one hand, and would sustain high atmospheric pressure conditions that are not conducive to the formation of precipitation over the continent, on the other hand. This should lead to decreased precipitation causing hydrological drought.

Be that as it may, the most significant contribution of this study is to highlight the existence of a relatively strong correlation between the most intense drought periods and NAO, suggesting that this climate index may be used to predict drought periods for the two water bodies studied.

### **Acknowledgments**

The authors wish to thank the three reviewers and the editors for their comments and suggestions which contributed to significant improvements to the form and content of this paper. They thank NSERC, The University of Quebec at Trois-Rivières, and RIVE for their financial support which made this work possible.

## References

- Anctil, F., and P. Coulibaly (2004), Wavelet analysis of the temporal variability in Southern Québec Streamflow, *J. clim.*, 17, 163-73.
- Assani, A.A., E. Gravel, T. Buffin-Bélanger, and A.G. Roy (2005). Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits minimums annuels en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Rev. Sci. Eau*, 18, 103-127.
- Assani, A.A, E. Stichelbout, A.G. Roy, and F. Petit (2006), Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrological regimes in Québec (Canada). *Hydrol. Process.* 20, 3485-3501.
- Assani, AA, F. Lajoie, M.E. Vadnais, and G. Beauchamp (2008), Analyse de l'influence de l'oscillation arctique sur la variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Québec, Canada) au moyen de la méthode des corrélations canoniques. *Rev. Sci. Eau*, 21, 21-33.
- Assani, A.A., D. Landais, M. Mesfioui, and M. Matteau (2010), Relationship between an Atlantic multidecadal oscillation index and variability of mean annual flows for catchments in the St. Lawrence watershed (Québec, Canada) during the past century. *Hydrol. Res.*, 41, 115-125.
- Assani, A.A., R. Landry, J. Daigle, and A. Chalifour (2011), Reservoirs effects on the temporal variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada). *Water Resource Manage* 25, 3661-3675.
- Assani, A.A., R. Landry, S. Biron, and J.-J. Frenette (2013), Analysis of the interannual variability of annual daily extreme water levels in the St.Lawrence River and Lake Ontario from 1918 to 2010. *Hydrological Processes*, doi: 10.1002/hyp.9941 (in press).
- Barlow, M., S. Nigam, and E.H. Berbery (2001), ENSO, Pacific Decadal Variability, and U.S. summertime precipitation, drought, and stream flow. *J. Clim.*, 14, 2105-2128.
- Bradbury, J.A., S.L. Dingman, and D.K. Barry (2002), New England drought and relations with large scale atmospheric circulation patterns. *J. Amer. Water Res. Ass.*, 38, 1287-1299.
- Brown, D.R. (2010), Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948-2005. *Hydrol. Process.*, 24, 1926-1954.



- Cook, E.R., D.M. Meko, D.W. Stahle, and M.K. Cleveland (1999), Drought reconstructions for the continental United States. *J. Clim.*, 12, 1145-1162.
- Cook, E.R., R. Seager, M.A. Cane, and D.W. Stahle (2007), North American drought: Reconstructions, causes, and consequences. *Earth Sci. Rev.*, 81, 93-134.
- Cook, B.I., R.L. Miller, and R. Seager (2009), Amplification of the North American "Dust Bowl" drought through human-induced land degradation. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 106, 4997, doi: 10.1073/pnas.0810200106
- Cook, B.I., R. Seager, and R.L. Miller (2011a), Atmospheric circulation anomalies during two persistent North American droughts: 1932-1939 and 1948-1957. *Clim. Dyn.*, 36, 2339-2355.
- Cook, I.B., E.R. Cook, K.J. Anchukaitis, R. Seager, and R.L. Miller (2011b), Forced and unforced variability of twentieth century North American droughts and pluvials. *Clim. Dyn.*, 37, 1097-1110.
- Cook, E.R., R. Seager, R.R. Heim, R.S. Vose, C. Herweijer, and C. Woodhouse (2010), Megadroughts in North America: placing IPCC projections of hydroclimatic change in a long-term palaeoclimate context. *J. Quatern. Sci.*, 25, 48-61.
- Coulibaly, P., and D.H. Burn (2004), Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows. *Water Resour. Res.*, 40, 1-14.
- Coulibaly, P., and D.H. Burn (2005), Spatial and temporal variability of Canadian seasonal streamflows. *J. Clim.*, 18, 191-210.
- Curtis, S (2008), The Atlantic multidecadal oscillation and extreme daily precipitation over the US and Mexico during the Hurricane season. *Clim. Dyn.*, 30, 343-351.
- Déry, S.J., and E.F. Wood (2004), Teleconnection between the Arctic Oscillation and Hudson Bay river discharge. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L118205, doi: 10.1029/2004GL020729
- Déry, S.J., and E.F. Wood (2005), Decreasing river in northern Canada. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L10401, doi: 10.1029/2005GL022845
- Enfield, D. B., A. Mestas-Nunez, and P. Trimble (2001), The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2077-2080.
- Feng, S., Q. Hu, and R.J. Oglesby (2011), Influence of Atlantic sea surface temperatures on persistent drought in North America. *Clim. Dyn.*, 37, 569-586.

- Goodrich, G.B. (2007), Multidecadal climate variability and drought in the United States. *Geogr. Compass*, 1-4, 713-738.
- Heim, R.R. (2002), A review of twentieth century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83, 1149-1165.
- Hudon, C (2004), Impact of water level fluctuations on St. Lawrence river aquatic vegetation. *Can. J. Fish. and Aquat. Sci.*, 54, 2853-2865.
- Kingston, D.G., D.M. Lawler, and G.R. McGregor (2006), Linkages between atmospheric circulation, climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects. *Progr. Phys. Geogr.*, 30, 143-174.
- Lajoie, F., A.A. Assani, A.G. Roy, and M. Mesfioui (2007), Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. *J. Hydrol.*, 334, 423-439.
- Lombard, F. (1987), Rank tests for changepoint problems. *Biometrika*, 74, 615-624.
- Mauget, S.A (2003), Multiecadal regime shifts in U.S. streamflow, precipitation, and temperature at the end of the Twentieth Century. *J. Clim.*, 16, 3905-3916.
- Mauget, S.A (2004), Intra- to multidecadal climate variability over the continental United States: 1932-99. *J. Clim.*, 16, 2215-2231.
- Matteau, M., A.A. Assani, and M. Mesfioui (2009), Application of multivariate statistical analysis methods to the dams hydrologic impact studies. *J. Hydrol.*, 371, 120-128.
- McBean, E, and H. Motiee (2008), Assessment of impact of climate change on water resources: a long term analysis of the Great Lakes of North America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 239-255.
- McCabe, G.J., M.A. Palecki, and J.L. Betancourt (2004), Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 101, 4136-4141.
- McCabe, G.J., J.L. Betancourt, S.T. Gray, M.A. Palecki, and H.G. Hidalgo (2008), Associations of multi-decadal sea-surface temperature variability with US drought. *Quatern. Intern.*, 188, 31-40.
- Mishra, A.K., and P.S. Vijay (2010), A review of drought concepts. *J. Hydrol.*, 391, 202-216.



- Mishra, A.K., and P.S. Vijay (2011), Drought modeling – A review. *J. Hydrol.*, 403, 157-175.
- Poff, N.L., J.D.Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegard, B.D. Richter, R.E. Sparks, and J.C. Stromberg (1997), The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47, 769-784.
- Quessy, J-F., A.C Favre, M. Saïd, and M. Champagne (2011), Statistical inference in Lombard's smooth-change model. *Environmetrics* 22, 882-893.
- Ritcher, B.D., J.V. Baumgartner, J. Powell, and D.P. Braun (1996), A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem. *Conserv. Biol.*, 10, 1163-1174.
- Schubert, S.D., M.J. Suarez, P.J. Pegion, , R.D. Koster, and J.T. Bacmeister (2004), Causes of long-term drought in the U.S. Great Plains. *J. Clim.*, 17, 485-503.
- Seager, R. (2007), The turn of the century North America drought: global context, dynamics, and past analogs. *J. Clim.*, 20, 5527-5552.
- Seagar, R., T.A. Tzanova, and J. Nakamura (2009), Drought in the Southern States: causes, variability over the last millennium, and the potential for future hydroclimate change. *J. Clim.*, 22, 5021-5045.
- Sutton, R.T., and L.R. Hodson (2005), Atlantic Ocean forcing of North American and European Summer climate. *Science*, 309, 115-118.
- Vadnais, M.E., A.A. Assani, R. Landry, D. Leroux, and D. Gratton (2012), Analysis of the effects of human activities on the hydromorphological evolution channel of the Saint-Maurice River downstream from La Gabelle dam (Quebec, Canada). *Geomorph.*, 175-176, 199-208.
- van Huijgevoor, M.H.J., P. Hazenberg, H.A.J. van Lanen, and R. Uijlenhoet (2012), A generic method for hydrological drought identification across different climate regions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2437-2451.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J.J., López-Moreno, J.I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., and A.S-L., Lopez-Moreno (2012) Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. *Earth Interactions*, 16, 1-27.
- Von-Storch, H and A. Navarra (Eds) (1995), *Analysis of Climate Variability*. Springer, New-York.

Yevjevich, V. (1967), An objective approach to definition and investigations of continental hydrologic droughts, Hydrology papers 23, Colorado State University, Fort Collins, USA.

## **CHAPITRE III**

### **CONCLUSION**

La présente étude avait comme objectif global de combler des lacunes concernant les connaissances sur l'enjeu émergent de la sécheresse hydrologique dans l'hydrosystème des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. À ce jour, les caractéristiques de la sécheresse hydrologique dans le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent n'avaient pas fait l'objet de travaux de recherche bien que le phénomène puisse avoir des impacts considérables dans les domaines économiques, sociaux et environnementaux. Une meilleure compréhension du phénomène est nécessaire dans la condition actuelle, mais également pertinente dans la perspective d'une intensification de l'occurrence des périodes de sécheresse en lien avec le phénomène des changements climatiques.

Les résultats acquis dans le cadre de ce projet de recherche ont permis d'analyser les aspects de la sécheresse hydrologiques des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent. Au moyen de la méthode des valeurs seuils proposée par Yevjevich (1967), l'étude a permis de définir les caractéristiques de la sécheresse hydrologique, c'est-à-dire la magnitude, la durée, la fréquence, la période d'occurrence et la variabilité de cette sécheresse pour le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent. Les tests de Lombard ont été utilisés pour analyser les impacts de la sécheresse sur la tendance à long terme et la stationnarité (moyenne et variance) des séries des niveaux d'eau moyens annuels du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent et pour ultimement comparer la variabilité interannuelle de ces caractéristiques entre les deux écosystèmes aquatiques. Enfin, les indices climatiques ont été mis en corrélation avec les niveaux d'eau moyens annuels pour obtenir des informations sur l'influence des facteurs climatique sur les caractéristiques de la sécheresse hydrologique.

L'aspect novateur de cette étude tient indiscutablement à l'introduction du « paradigme des régimes hydrologiques naturels » pour déterminer les cinq caractéristiques de la sécheresse hydrologique des niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent et du lac Ontario. De plus, aucune étude, à notre connaissance, n'a établi de relation entre les indices climatiques et les niveaux d'intensité de la sécheresse hydrologique du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Les résultats de cette étude démontrent l'existence d'une forte corrélation entre les périodes de sécheresse intenses. Nos résultats tendent à indiquer que l'indice climatique de l'oscillation nord-atlantique (ONA) serait adéquat pour la mise au point de méthodes de prédiction des périodes de sécheresse hydrologique pour ces deux étendues d'eau. En outre, ces résultats permettent une meilleure compréhension de l'hydrosystème des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent et de sa vulnérabilité face à la sécheresse hydrologique en vue d'une amélioration continue de la gestion de cette ressource hydrique.

Enfin, plusieurs avenues de recherche restent à explorer quant à la caractérisation de la sécheresse hydrologique, et plus spécifiquement dans la région des Grands Lacs et du Saint-Laurent. Les résultats présentés dans cette étude permettent d'orienter les futures études sur le sujet. Dans ce cas, l'étude a été limitée au lac Ontario et au fleuve Saint-Laurent. Il semblerait donc pertinent pour de futures études de réaliser les analyses sur l'ensemble des cinq grands lacs. Des analyses à l'échelle saisonnières restent également à explorer.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anctil, F. and P. Coulibaly (2004). "Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec Streamflow". *Journal of Hydrology* 17: 163-173.
- Ashworth, W. (1986). *The late, Great Lakes: an environmental history*. New York, Random House.
- Assani, A. A., L. F., V. M.-E. and G. Beauchamp (2008). "Analyse de l'influence de l'oscillation arctique sur la variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin versant de la rivière Saint-François (Québec, Canada) au moyen de la méthode des corrélations canoniques". *Revue des sciences de l'eau* 21: 21-33.
- Assani, A. A., E. Gravel, T. Buffin-Bélanger and A. G. Roy (2005). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits minimums annuels en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada)". *Revue des sciences de l'eau* 18: 103-127.
- Assani, A. A., E. Stichelbout, A. G. Roy and F. Petit (2006). "Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrological regimes in Québec (Canada)". *Hydrological Processes* 20: 3485-3501.
- Bartolaj, A. M., L. He, A. E. Hurst, L. Mortsch, R. Paehlke and D. Scavia (2015). "Climate change as a driver of change in the Great Lakes St. Lawrence River Basin". *Journal of Great Lakes Research* 41, Supplement 1(0): 45-58.
- Beaulieu, C., T. B. M. J. Ouarda and O. Seidou (2008). *Modélisation du surenforcement des navires marchands qui transitent par le fleuve Saint-Laurent*. Québec (Qc), Canada.
- Bonsal, B. R., X. Zhang, L. A. Vincent and W. D. Hogg (2001). "Characteristics of Daily and Extreme Temperatures over Canada". *Journal of Climate* 14(9): 1959-1976.
- Botts, L. and B. Krushelnicki (1987). *The Great Lakes: An Environmental Atlas and Resource Book*. Chicago, U.S. Environmental Protection Agency.
- Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier and A. G. Roy (2010). "Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries". *Journal of Hydrology* 384: 65-83.

- Brown, P. J., R. S. Bradley and F. T. Keimig (2010). "Changes in Extreme Climate Indices for the Northeastern United States, 1870-2005." *Journal of Climate* 23(24): 6555-6572.
- Bruxer, J. K. and C. Southam (2008). Review of Apparent Vertical Movement Rates in the Great Lakes Region. (Accessed online 12-08-2014 at: [http://cpanel.iugls.org/DocStore/ProjectArchive/DVR\\_StClairDataVerificationAndReconciliation/DVR02\\_Bruxer\\_ReviewVerticalMovementRates/Reports/DVR02-R1\\_Bruxer.pdf](http://cpanel.iugls.org/DocStore/ProjectArchive/DVR_StClairDataVerificationAndReconciliation/DVR02_Bruxer_ReviewVerticalMovementRates/Reports/DVR02-R1_Bruxer.pdf))
- Cole, K. L., M. B. Davis, F. Stearns, G. Guntenspergen and K. Walker (1998). Historical Landcover Changes in the Great Lakes Region. B. R. D. U.S. Geological Survey: 104.
- Cook, E. R., R. Seager, M. A. Cane and D. W. Stahle (2007). "North American drought: Reconstructions, causes, and consequences". *Earth Sciences-Reviews* 81: 93-134.
- Côté, H., T. Logan and I. Charron (2014). Vers l'adaptation - Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec, Ouranos.
- Council of Great Lakes Governors, (2015). "Governors and Premiers". (Accessed online 12-08-2014 at: <http://www.cglg.org/governors/>)
- Curtis, S. (2008). "The Atlantic multidecadal oscillation and extreme daily precipitation over the US and Mexico during the Hurricane season". *Climatic Dynamics* 30: 343-351.
- Déry, S. J. and E. F. Wood (2004). "Teleconnection between the Arctic Oscillation and Hudson Bay river discharge". *Geophysical Research Letters* 31: L118205.
- Donat, M. G., L. V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, R. J. H. Dunn, K. M. Willett, E. Aguilar, M. Brunet, J. Caesar, B. Hewitson, C. Jack, A. M. G. Klein Tank, A. C. Kruger, J. Marengo, T. C. Peterson, M. Renom, C. Oria Rojas, M. Rusticucci, J. Salinger, A. S. Elrayah, S. S. Sekele, A. K. Srivastava, B. Trewin, C. Villarroel, L. A. Vincent, P. Zhai, X. Zhang and S. Kitching (2013). "Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(5): 2098-2118.
- Ehsanzadeh, E., H. M. Saley, T. B. M. J. Ouarda, D. H. Burn, A. Pietroniro, O. Seidou, C. Charron and D. Lee (2013). "Analysis of changes in the Great Lakes hydro-climatic variables". *Journal of Great Lakes Research* 39(3): 383-394.

- Enfield, D. B., A. M. Mestas-Nunez and P. Trimble (2001). "The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US." *Geophysical Research Letters* 28: 2077-2080.
- Environnement Canada. (2013). "How are the Great Lakes Doing? Phosphorus and Excess Algal Growth." (Accessed online 04-08-2015 at: <https://www.ec.gc.ca/grandslacs-greatlakes/default.asp?lang=En&n=6201FD24-1>)
- Ficke, A., C. Myrick and L. Hansen (2007). "Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries." *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 17(4): 581-613.
- Gabriel, A. O. and R. D. Kreutswiser (1993). "Rought Hazard In Ontario: A Review Of Impacts, 1960-1989, And Management Implication." *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 18(2): 117-132.
- Goodrich, G. B. (2007). "Multidecadal climate variability and drought in the United States." *Geography Compass* 1/4: 713-738.
- Gössling, S. and M. C. Hall (2006). *Tourism and Global Environmental Change: Ecological, Economic, Social and Political Interrelationships* New-York, Routledge.
- Hall, N. D. and B. B. Stuntz. (2007). "Climate Change and Great Lakes Water Resources. National Wildlife Federation." (Accessed online 24-04-2015 at: [http://online.nwf.org/site/DocServer/Climate\\_Change\\_and\\_Great\\_Lakes\\_Water\\_Resources\\_Report\\_FI.pdf](http://online.nwf.org/site/DocServer/Climate_Change_and_Great_Lakes_Water_Resources_Report_FI.pdf))
- Hodgkins, G. A., R. W. Dudley and S. S. Aichele. (2007). "Historical Changes in Precipitation and Streamflow in the U.S. Great Lakes Basin, 1915–2004." (Accessed online 24-04-2015 at: <http://pubs.usgs.gov/sir/2007/5118/pdf/SIR2007-5118.pdf>)
- Hudon, C. (1997). "Impact of water level fluctuations on St. Lawrence River aquatic vegetation." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54(12): 2853-2865.
- Hunter, T. S., A. H. Clites, K. B. Campbell and A. D. Gronewold (2015). "Development and application of a North American Great Lakes hydrometeorological database Part I: Precipitation, evaporation, runoff, and air temperature." *Journal of Great Lakes Research* 41(1): 65-77.
- Hupy, C. M. and A. M. G. A. WinklerPrins (2005). "A Political Ecology of Forest Exploitation in the Lower Peninsula of Michigan." *The Great Lakes Geographer* 12(1): 28-44.

- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, Switzerland. (Accessed online 05-03-2015 at: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf/](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf/))
- Kingston, D. G., D. M. Lawler and G. R. McGregor (2006). "Linkages between atmospheric circulation, climate and streamflow in the northern North Atlantic: research prospects." *Progress in Physical Geography* 30: 143-174.
- Lajoie, F., A. A. Assani, A. G. Roy and M. Mesfioui (2007). "Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons." *Journal of Hydrology* 334: 423-439.
- Lamon, E. C. and C. A. Stow (2010). "Lake Superior water level fluctuation and climatic factors: A dynamic linear model analysis." *Journal of Great Lakes Research* 36(1): 172-178.
- Larson, G. and R. Schaetzel (2001). "Origin and Evolution of the Great Lakes." *Journal of Great Lakes Research* 27(4): 518-546.
- Maghrebi, M., D. Nalley, K. L. Laurent and J. F. Atkinson (2015). "Water quantity as a driver of change in the Great Lakes–St. Lawrence River Basin." *Journal of Great Lakes Research* 41, Supplement 1(0): 84-95.
- Mailhot, A., S. Duchesne, G. Talbot, A. Rousseau, N. and D. Chaumont (2008). *Approvisionnement en eau potable et santé publique : projections climatiques en matière de précipitations et d'écoulements pour le sud Québec I. n. d. s. p. d. Québec. Québec, Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau : 178.*
- Martin Associates (2011). *The Economic Impacts of the Great Lakes St. Lawrence Seaway System*. Lancaster, PA.
- Matteau, M., A. A. Assani and M. Mesfioui (2009). "Application of multivariate statistical analysis methods to the dams hydrologic impact studies." *Journal of Hydrology* 371: 120-128.
- McCabe, G. J., M. A. Palecki and J. L. Betancourt (2004). "Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101(12): 4136-4141.
- Melillo, J. M., R. Terese and Y. W. Gary (2014). *Highlights of Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment U.S. Global Change Research Program*: 148 pp.



- Millerd, F. (2011). "The potential impact of climate change on Great Lakes international shipping." *Climatic Change* 104(3-4): 629-652.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2014). "Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec." (Accessed online 21-04-2015 at: <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/>)
- Mishra, A. K. and V. P. Singh (2010). "A review of drought concepts." *Journal of Hydrology* 391(1-2): 202-216.
- Morin, J. and M. Leclerc (1998). "From pristine to present state: hydrology evolution of Lake Saint-François, St. Lawrence River." *Canadian Journal Civil Engineering* (25): 864-879.
- Mortsch, L., H. Hengeveld, M. Lister, B. Lofgren, F. Quinn, M. Slivitzky and L. Wenger (2000). "Climate Change Impacts on the Hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence System." *Canadian Water Resources Journal* 25(2): 153-179.
- Mortsch, L. D. and F. H. Quinn (1996). "Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies." *Limnology and Oceanography* 41(5): 903-911.
- Mosley, L. M. (2015). "Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration." *Earth-Science Reviews* 140(0): 203-214.
- Natural Resources Canada (2014). "Climate Change Publications: Adaptation." (Accessed online 22-01-2015 at: <https://www.nrcan.gc.ca/environment/resources/publications/10766>)
- Olivier, J. (2015). "Les Grands Lacs plus gelés qu'à l'habitude." (Accessed online 10-04-2015 at: <http://www.meteomedia.com/nouvelles/articles/les-grands-lacs-plus-geles-qua-lhabitude-/45957/>)
- Plan d'action Saint-Laurent 2011-2026 (2015). "La qualité de l'eau du secteur fluvial : Transport des contaminants dans le Saint-Laurent." (Accessed online 23-04-2015 at: [http://planstlaurent.qc.ca/fr/suivi\\_de\\_letat/fiches\\_de\\_suivi/la\\_qualite\\_de\\_leau\\_du\\_secteur\\_fluvial.html](http://planstlaurent.qc.ca/fr/suivi_de_letat/fiches_de_suivi/la_qualite_de_leau_du_secteur_fluvial.html))
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks and J. C. Stromberg (1997). "The Natural Flow Regime." *BioScience* 47(11): 769-784.

- Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell and D. P. Braun (1996). "A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems." *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174.
- Schubert, S. D., M. J. Suarez, P. J. Pegion, R. D. Koster and J. T. Bacmeister (2004). "Causes of long-term drought in the U.S. Great Plains." *Journal of Climate* 17: 485-503.
- Sellinger, C. E., C. A. Stow, E. C. Lamon and S. S. Qian (2008). "Recent water level declines in the Lake Michigan–Huron system." *Environ. Sci. Technol.* 42: 367-373.
- Shabbar, A. and W. Skinner (2004). "Summer Drought Patterns in Canada and the Relationship to Global Sea Surface Temperatures." *Journal of Climate* 17: 2866-2880.
- Shaw Chraïbi, V. L., A. R. Kireta, E. D. Reavie, M. Cai and T. N. Brown (2014). "A paleolimnological assessment of human impacts on Lake Superior." *Journal of Great Lakes Research* 40(4): 886-897.
- Stone, D. A., A. J. Weaver and F. W. Zwiers (2000). "Trends in Canadian Precipitation Intensity." *Atmosphere-Ocean* 38: 321-347.
- Sutton, R. T. and L. R. Hodson (2005). "Atlantic Ocean forcing of North American and European Summer climate." *Science* 309: 115-118.
- Swackhamer, D. L. (2014). "Water Quality in the Great Lakes: Persistent Organic Pollutants (POPs)." *Comprehensive Water Quality and Purification*. S. Ahuja. Waltham, Elsevier: 120-135.
- Talbot, A. (2006). *Enjeux de la disponibilité de l'eau pour le fleuve Saint-Laurent - Synthèse environnementale*. Environnement Canada. Montréal: 215.
- Upper Great Lakes Study Board (2012). *Lake Superior regulation: addressing uncertainty in Upper Great Lakes Water Levels. Summary of Findings and Recommendations*. (Accessed online 03-12-2014 at: [http://www.ijc.org/files/publications/Lake\\_Superior\\_Regulation\\_Full\\_Report.pdf](http://www.ijc.org/files/publications/Lake_Superior_Regulation_Full_Report.pdf))
- US Army Corps of Engineers (2009). "Great Lakes Navigation System: Economic Strength to the Nation." (Accessed online 31-03-2015 at: <http://www.lcships.com/wp-content/uploads/2012/07/Great-Lakes-Navigation-Economic-Strength-to-the-Nation.pdf>)

- Vadnais, M.-E., A. A. Assani, R. Landry, D. Leroux and D. Gratton (2012). "Analysis of the effects of human activities on the hydromorphological evolution channel of the Saint-Maurice River downstream from La Gabelle dam (Quebec, Canada)." *Geomorphology* 175-176: 199-208.
- Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, J. Lorenzo-Lacruz, J. J. Camarero, J. I. López-Moreno, C. Azorin-Molina, J. Revuelto, E. Morán-Tejeda and A. Sanchez-Lorenzo (2012). "Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications." *Earth Interactions* 16(10): 1-27.
- Wall, G. (1998). "Implications of Global Climate Change for Tourism and Recreation in Wetland Areas." *Climatic Change* 40(2): 371-389.
- Wilcox, K. L., S. A. Petrie, L. A. Maynard and S. W. Meyer (2003). "Historical Distribution and Abundance of *Phragmites australis* at Long Point, Lake Erie, Ontario." *Journal of Great Lakes Research* 29(4): 664-680.
- Yevjevich, V. (1967). *An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Drought*. Hydrology Paper Fort Collins, Colorado, Colorado State University.
- Zhang, X., L. A. Vincent, W. D. Hogg and A. Niitso (2000). "Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century" *Atmosphere-Ocean* 38: 395-429.